



**José Eduardo
Gomes Oliveira**

**Correcção de interferência electromagnética em
sistemas de localização**



**José Eduardo
Gomes Oliveira**

Correcção de interferência electromagnética em sistemas de localização

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Dr. Luís Cadillon Costa, Professor Associado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e do Dr. José Alberto Fonseca, Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi realizado no âmbito do programa 039/7.1/ADI/NOR – TELESAL – “Projecto LOPES”, apoiado pela TELESAL – Rede de Competências em Telecomunicações e Tecnologias de Informação em Aveiro, suportada pela AdI (Agência de Inovação).

Este trabalho foi apoiado pela Micro I/O, Sistemas Electrónicos Lda., e pelo NITEC/114/20/06 (71/00101), TIGELA – Tecnologias de Informação para Gestão de Locais de Acesso Público, Programa PRIME, suportado pela AdI (Agência de Inovação).

à Manuela

O júri

Presidente

Prof. Dr. Fernando Vístulo de Abreu

Professor Auxiliar do Departamento de Física da
Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Dr. Mário Jorge Leitão

Professor Associado da Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

Prof. Dr. Luís Cadillon Costa (Orientador)

Professor Associado do Departamento de Física da
Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Alberto Fonseca (Co-orientador)

Professor Associado do Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, o Professor Luís Cadillon Costa e o Professor José Alberto Fonseca, por me terem proposto este trabalho e por tão bem me terem guiado no desenvolvimento e conclusão do mesmo, mostrando sempre disponibilidade para esclarecerem as minhas dúvidas.

Agradeço ao Paulo Bartolomeu toda a ajuda que me prestou ao longo deste projecto e pelo acompanhamento em cada decisão.

Agradeço à TELESAL, à Micro I/O e ao Professor José Alberto Fonseca, a enorme oportunidade que me deram de integrar um projecto de investigação em Aveiro, o que me proporcionou a realização do mestrado em Engenharia Física e em particular esta dissertação, bem como dar o primeiro passo no mundo profissional.

Agradeço à Idália por toda a compreensão que teve comigo durante esta nova fase da minha vida.

Agradeço à minha família por toda a dedicação e apoio que me deram até hoje, e que foi fundamental para que eu pudesse usufruir desta oportunidade.

Palavras-Chave

Coexistência, interferência, sistemas de localização, IEEE 802.15.4, *ZigBee*.

Resumo

Esta dissertação apresenta um estudo do impacto de ruído de elevada potência em sistemas de localização baseados em IEEE 802.15.4. No documento são apresentados exemplos de sistemas de localização, focando a análise nas arquitecturas e modo de operação, e em particular o Projecto LOPES no qual este trabalho está inserido. São discutidos os mecanismos da camada física do standard IEEE 802.15.4 que possibilitam a filtragem de ruído, e são realizados ensaios para verificar a sua eficácia. Por fim conclui-se que esta tecnologia tem capacidade para operar em cenários de ruído extremo. Contudo, esse ruído terá um impacto significativo no sistema de localização, aumentando o atraso médio na localização e diminuindo a exactidão do sistema.

Keywords

Coexistence, interference, location systems, IEEE 802.15.4, *ZigBee*.

Abstract

This dissertation presents a study of the impact of high power noise in 802.15.4 based location systems. Location systems are presented by focusing on its architecture and operation. A particular attention has been put on the LOPES project in which scope this work has been done. The 802.15.4 physical mechanisms that deal with noise are discussed and experimental trials are conducted to verify their effectiveness. The conclusion is that this technology is able to operate in extreme noise scenarios. However, this has a significative impact in the location system, due to the increase in the delay and the decrease in accuracy.

Índice de conteúdos

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Motivação..... | 2 |
| 1.2. Organização do documento..... | 3 |
| 2. Sistemas de Localização..... | 4 |
| 2.1. Técnicas de localização | 4 |
| 2.1.1. Identificação directa..... | 4 |
| 2.1.2. Aquisição de tempo..... | 5 |
| 2.1.3. Observação do ângulo de recepção..... | 6 |
| 2.1.4. Medição da força de sinal recebido..... | 6 |
| 2.2. Soluções de localização genéricas | 7 |
| 2.2.1. Active Badge Location System..... | 7 |
| 2.2.2. Active Bat - Ultrasonic Location System..... | 9 |
| 2.2.3. 60 GHz OFDM Indoor Location System..... | 10 |
| 2.2.4. Bluetooth Indoor Location System..... | 12 |
| 2.2.5. Parco Real-Time Location System..... | 13 |
| 2.2.6. Ubisense – Local Positioning Systems..... | 15 |
| 2.2.7. PanGo Integrated Asset Tracking Solution..... | 16 |
| 2.2.8. Ekahau Real-Time Location System..... | 18 |
| 2.2.9. Exavera eShepherd™..... | 19 |
| 2.2.10. AeroScout Visibility System..... | 20 |
| 2.3. Sistemas baseados em RSSI sobre IEEE 802.15.4 / ZigBee..... | 22 |
| 2.3.1. Indoor Local Positioning System For ZigBee, Based on RSSI..... | 22 |
| 2.3.2. Projecto LOPES – Localização de PESsoas..... | 24 |
| 2.4. Conclusão..... | 26 |
| 3. IEEE 802.15.4 / ZigBee..... | 27 |
| 3.1. Topologias de rede..... | 28 |
| 3.1.1. Topologia Star..... | 29 |
| 3.1.2. Topologia Mesh..... | 29 |
| 3.1.3. Topologia Cluster-tree..... | 30 |
| 3.2. Controlo de acesso ao meio..... | 30 |
| 3.2.1. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance..... | 31 |
| 3.3. IEEE 802.15.4 PHY – ISM 2,4 GHz..... | 32 |
| 3.3.1. Clear Channel Assessment..... | 32 |
| 3.3.2. Offset-Quadrature Phase Shift Keying..... | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Introdução de interferência em sistemas ZigBee..... | 35 |
| 4.1.Coexistência na banda ISM 2,4 GHz..... | 36 |
| 4.2.Trabalhos relacionados..... | 36 |
| 4.3.Set up experimental..... | 37 |
| 5. Resultados experimentais e validação teórica..... | 41 |
| 5.1.Ensaio de Potência..... | 41 |
| 5.2.Ensaio de Orientação..... | 43 |
| 5.3.Discussão dos resultados..... | 44 |
| 6. Conclusões e trabalhos futuros..... | 47 |
| <i>Linhas orientadoras para trabalho futuro.....</i> | <i>48</i> |
| Referências..... | 49 |
| Anexo | 51 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1. DTDOA – esquema de tempos decorridos..... | 5 |
| Fig. 2.2: Esquema demonstrativo da determinação do valor de AOA [3]..... | 6 |
| Fig. 2.3. Active Badge Location System: Rede de sensores IR (fonte [8])..... | 8 |
| Fig. 2.4. Rede de sensores do sistema Active Badge [11]..... | 9 |
| Fig. 2.5: Arquitectura do sistema de localização [13]..... | 11 |
| Fig. 2.6: Vista geral do sistema Bluetooth ILS [15]..... | 12 |
| Fig. 2.7. Vista geral do sistema de localização da Parco..... | 14 |
| Fig. 2.8: Rede de Sensores do sistema Ubisense [19]..... | 15 |
| Fig. 2.9: Vista geral do RTLS da PanGo [20]..... | 17 |
| Fig. 2.10: Vista geral do RTLS da Ekahau [22]..... | 18 |
| Fig. 2.11: Componentes do sistema Exavera eShepherd™ [23]..... | 20 |
| Fig. 2.12: Vista geral do Visibility System [25]..... | 21 |
| Fig. 2.13: Sistema implementado na Master's room, Mid Sweden University [5]..... | 23 |
| Figura 2.14 [1]: Arquitectura do sistema de localização do projecto LOPES..... | 24 |
| Figura 2.15 [28]: Mensagens trocadas na rede ZigBee durante o processo de localização.. | 25 |
| Fig. 3.1: ZigBee Stack..... | 28 |
| Fig. 3.2: Rede Star..... | 29 |
| Fig. 3.3: Rede mesh..... | 29 |
| Fig. 3.4: Rede Cluster-tree..... | 30 |
| Fig. 3.5 [33]: Estrutura de uma superframe..... | 30 |
| Fig. 3.6 [34]: Estrutura do mecanismo CSMA/CA para o BE..... | 31 |
| Fig. 3.7 [32]: Processamento de sequências PN por modulação O-QPSK..... | 32 |
| Fig. 3.8 [32]: Sub-portadoras usadas pelo método DSSS..... | 33 |
| Fig. 3.9: Processamento de sinal com DSSS [35]..... | 33 |
| Fig. 4.1: Distribuição de canais na banda ISM 2,4 GHz. Em cima os 16 canais ZigBee, do 11 ao 26. Em baixo os canais Wi-Fi 1, 6 e 11..... | 36 |
| Fig. 4.2: Dispositivo MioBee (sem antena)..... | 37 |
| Fig. 4.3: Dispositivo experimental para avaliação de desempenho..... | 38 |
| Fig. 4.4: Disposição da sala de ensaios..... | 39 |
| Fig. 4.5: Representação das disposições das antenas..... | 39 |
| Fig. 5.1: Número de pacotes perdidos por potência de ruído..... | 42 |
| Fig. 5.2: Atraso entre comunicações ZigBee por potência de ruído..... | 42 |
| Fig. 5.3: Número de pacotes perdidos por orientação da fonte de dados..... | 43 |
| Fig. 5.4: Atraso entre comunicações ZigBee por orientação da fonte de dados..... | 44 |
| Fig. 5.5: PER vs distância entre redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b (fonte [32])..... | 44 |
| Fig. 5.6: Reunião do espectro do sinal ZigBee..... | 45 |

Índice de tabelas

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabela 1: Características do Active Badge [10].....</i> | <i>8</i> |
| <i>Tabela 2: Características do Active Bat [12].....</i> | <i>10</i> |
| <i>Tabela 3: Características do OILS [13].....</i> | <i>12</i> |
| <i>Tabela 4: Características do BILS (HUB/IHP) [15].....</i> | <i>13</i> |
| <i>Tabela 5: Características do RTLS da Parco [18].....</i> | <i>15</i> |
| <i>Tabela 6: Características do Ubisense [19].....</i> | <i>16</i> |
| <i>Tabela 7: Características da PanGo's V3 Tag [20].....</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabela 8: Características do sistema RTLS da Ekahau [22].....</i> | <i>19</i> |
| <i>Tabela 9: Características dos dispositivos Exavera [24].....</i> | <i>20</i> |
| <i>Tabela 10: Características do Aeroscout Visibility System [25].....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabela 11: Características do ILPS [5].....</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabela 12: Características do LOPES.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabela 13: Configuração dos módulos ZigBee.....</i> | <i>38</i> |

Capítulo 1

Introdução

A localização de pessoas e bens em espaços fechados permite às instituições uma melhor gestão dos recursos existentes nesse espaço, a garantia de maior segurança, e potencia ainda a optimização dos processos associados ao seu normal funcionamento. Os sistemas de localização são, hoje em dia, utilizados para dar resposta a muitos problemas logísticos nos mais diversos cenários de aplicação. Em linhas de produção, estes sistemas permitem acompanhar os processos, identificar falhas e disparar alarmes, produzir relatórios de tempo e de espaço, constituindo uma verdadeira ferramenta de gestão com resultados muito significativos ao nível dos custos de produção. Em ambiente hospitalar, este tipo de solução permite a monitorização de pessoas e objectos, a identificação de equipamentos e pessoal especializado no espaço e no tempo, conduzindo a uma melhor gestão do percurso de um paciente, optimizando os serviços a este prestados conforme as disponibilidades instantâneas e locais de recursos materiais e humanos.

O Projecto LOPES – LLocalização de PESsoas em espaços reservados – tem como objectivo desenvolver uma solução tecnológica para a localização de pessoas em espaços interiores, baseada em comunicações sem fios e com capacidade de resolução fina. O projecto prevê ainda o desenvolvimento de uma aplicação para a gestão do sistema e monitorização da localização. Neste contexto será desenvolvido um demonstrador a instalar na Fábrica – Centro Ciência Viva de Aveiro. Pretende-se que a solução seja capaz de identificar, em cada instante, o módulo interactivo em frente ao qual a pessoa se encontra. A solução poderá também facultar relatórios de tempo pessoa-módulo, permitindo ao gestor do espaço avaliar as experiências que recebem mais atenção e reconhecer perfis de curiosidade em cada visitante para um contacto futuro.

A Fábrica é um espaço dinâmico de divulgação da ciência e de estímulo à curiosidade científica, onde se promove a interacção táctil com processos científicos e tecnológicos. Neste espaço são também organizados laboratórios didácticos e realizadas exposições temporárias. A Fábrica é uma iniciativa da Universidade de Aveiro em colaboração com a Câmara Municipal de Aveiro, gerida pela Fundação João Jacinto Magalhães e apoiada pela Associação Ciência Viva. O programa Ciência Viva foi criado em 1996, com a missão de promover a cultura científica e tecnológica em Portugal. Em 1998, com o objectivo de dirigir ao ensino a promoção destas áreas, foi criada a Associação Ciência Viva – Agência Nacional para a Cultura Científica e Tecnológica. Foi neste contexto que nasceu a Rede Nacional de Centros Ciência Viva que conta neste momento com 13 centros, um dos quais a Fábrica, em Aveiro.

Neste trabalho é estudado o comportamento de um sistema de localização baseado em redes de sensores em fios, sob forte interferência electromagnética proveniente de sistemas que possam coexistir na banda livre *Industrial, Scientific and Medical* (ISM). O estudo [1] é focado na avaliação de desempenho de uma ligação *ZigBee* ponto a ponto na presença de uma fonte de ruído – um gerador de microondas – observando os parâmetros de atraso médio de pacotes transmitidos e número de pacotes perdidos. É ainda discutida a forma como a modulação *offset-quadrature phase shift keying* (O-QPSK) e a técnica de espalhamento *Direct-sequence Spread Spectrum* (DSSS) podem melhorar o desempenho de um sistema de localização, superando interferência semelhante à imposta nos ensaios.

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto LOPES, realizado no Departamento de Física da Universidade de Aveiro e na Micro I/O em Aveiro, e constitui a dissertação de mestrado em Engenharia Física da Universidade de Aveiro. A Micro I/O é uma empresa de soluções de electrónica, parceira do projecto LOPES e associada da Inova-Ria – Associação de Empresas para uma Rede de Inovação em Aveiro. O LOPES é um projecto desenvolvido no âmbito de uma rede de competências da Agência de Inovação (AdI), a rede TELESAL – Rede de Competências em Telecomunicações e Tecnologias de Informação em Aveiro – rede integrada pelas instituições: Universidade de Aveiro, Inova-Ria, Instituto de Telecomunicações, PT Inovação e Nokia Siemens Networks.

1.1. Motivação

Nos dias de hoje, a maioria dos espaços fechados de carácter comercial ou institucional estão cobertos por redes *Wi-Fi*. Também nos equipamentos móveis, dos computadores portáteis aos PDAs, dos GPSs aos telemóveis, é hoje comum encontrar as tecnologias *Wi-Fi* e *Bluetooth*. A crescente procura por soluções sem fios de acesso à internet e de troca de ficheiros a curto alcance despoletou no início do século o desenvolvimento e a redução de preço destas tecnologias. Recentemente, o aumento da procura por soluções de baixo custo para controlo de sistemas a curto alcance e com baixo consumo de energia, fez crescer o desenvolvimento da tecnologia *ZigBee*. Em 2004 foi lançado o primeiro telemóvel equipado com *ZigBee*, projectado para exercer funções de controlo de habitações. Da domótica à localização de bens e pessoas, é previsível que esta tecnologia se venha a tornar tão comum como as anteriores, aumentando também as preocupações sobre o desempenho destas soluções em funcionamento simultâneo no mesmo espaço.

Todas as tecnologias referidas podem operar na banda 2,4 GHz ISM, podendo assim ocorrer a partilha do canal físico e a interferência destrutiva de dados. A coexistência pode assim afectar o desempenho das redes, provocando atrasos nas transmissões e perdas de pacotes

enviados. Estes efeitos têm grande impacto num sistema de localização, causando atrasos no processo de localização, bem como a degradação da exactidão na determinação de posições.

1.2. Organização do documento

No capítulo 2 são identificadas e explicadas algumas técnicas de localização de dispositivos móveis. Os mais citados sistemas de localização, baseados em várias tecnologias (infravermelhos, ultrasons, *Wi-Fi e ZigBee fingerprinting*, *Bluetooth* e UWB), são identificados e caracterizados, abordando as suas arquitecturas. Esta secção apresenta maior ênfase em sistemas a operar na banda ISM, dos quais se destacam os sistemas baseados no standard IEEE 802.15.4, e em particular o Projecto LOPES.

No capítulo 3 é apresentada a tecnologia *ZigBee* e a especificação que está na sua base, a tecnologia IEEE 802.15.4. São apresentadas as características da formação de redes e os mecanismos de acesso ao meio físico. São ainda discutidas a modulação *offset-quadrature phase shift keying* (O-QPSK) e a técnica de espalhamento *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS).

No capítulo 4 é analisado o impacto do ruído no sistema de localização LOPES, e o que isso implica na localização de pessoas. Neste capítulo descreve-se o *set-up* experimental dos ensaios de coexistência *ZigBee*–microondas, bem como as condições de avaliação do desempenho da rede *ZigBee*.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos, e é realizada a análise e discussão dos mesmos, com o objectivo de compreender os impactos na localização.

No último capítulo são apresentadas as conclusões do estudo e as linhas de orientação para o trabalho futuro.

Capítulo 2

Sistemas de Localização

Um sistema de localização é genericamente constituído por 3 entidades diferentes, sensores fixos, módulos móveis, e um elemento gestor da rede de sensores. Nas aplicações em espaços fechados, os sensores são habitualmente colocados no tecto ou em posições superiores nas paredes. Os módulos móveis são monitorizados pelos sensores, sendo a sua localização efectuada pela própria rede ou por um PC ligado a esta, a partir da informação de monitorização. Num caso genérico, o gestor da rede pode configurar a rede, estabelecer regras e prioridades nas comunicações, e pode também servir de elo de ligação entre a rede de sensores e o PC. O desenvolvimento de um sistema de localização envolve a combinação de uma tecnologia de sensores/telecomunicações e de uma técnica de localização associada à informação colectada. Nesta secção são apresentadas as técnicas de localização e as tecnologias sem fios mais usadas em sistemas de localização.

2.1. Técnicas de localização

2.1.1. Identificação directa

A localização de um dispositivo móvel pode ser concretizada a partir do reconhecimento da presença deste em frente a um determinado sensor. Os selos *radio-frequency identification* (RFID) passivos, presentes em livros, CDs e DVDs, são exemplo destes sistemas, permitindo identificar um produto entre dois sensores de uma saída de caixa. A localização por infravermelhos é outro exemplo deste conceito, identificando um determinado emissor junto a um determinado sensor.

2.1.2. Aquisição de tempo

O conceito de localização de dispositivos por medição de tempo consiste em relacionar a velocidade de propagação do sinal transmitido com o tempo de transmissão do mesmo, e assim determinar a distância entre o emissor e o receptor, bem como identificar a posição de um relativamente ao referencial do outro. Existem várias técnicas baseadas neste conceito: *time-of-arrival* (TOA), *times-difference of arrival* (TDOA), *time-of-flight* (TOF) e *differential times-difference of arrival* (DTDOA). Estas técnicas são aqui descritas sumariamente e serão explicadas de forma mais ilustrada nos exemplos apresentados em 2.2.

A primeira técnica consiste em guardar as “etiquetas” temporais de transmissão e recepção de sinal. O tempo de transmissão é determinado a partir do valor do instante de transmissão e o TOA marcado pelo receptor. Esta técnica exige a sincronização da rede.

Os sistemas de localização baseados em TDOA procedem à aquisição do tempo de transmissão, em vez do cálculo deste a partir de dois instantes. Para esse efeito, estes sistemas usam habitualmente duas tecnologias diferentes com velocidades de propagação distintas. A tecnologia de maior velocidade de propagação é usada para sinalizar o início da contagem temporal, enquanto a recepção do segundo sinal faz terminar essa mesma contagem, dando origem ao TDOA. A partir da velocidade de propagação do segundo sinal, consegue-se uma relação distância-tempo.

Com maior facilidade de implementação, a TOF é uma técnica de medição do tempo de uma comunicação entre dois pontos. Neste método, o módulo fonte inicia a contagem de tempo no instante em que transmite um sinal, terminando esta contagem no instante em que recebe a resposta. Após efectuar a compensação do tempo de processamento (t_p) do módulo destino e dividir o tempo corrigido pelos dois sentidos da comunicação, o módulo fonte determina o tempo de transmissão (t_T), que será usado no cálculo de distâncias e na determinação das posições relativas dos módulos.

A localização por DTDOA pode ser vista como um conjunto das técnicas anteriores e de um algoritmo de diferenciação. O método tem como princípio a obtenção de vários tempos e é coordenado por um sensor fixo (SF), normalmente o gestor/coordenador (CO) da rede de sensores. Esta unidade procede ao *broadcast* de uma mensagem do tipo *request* (Fig. 2.1), esperando uma mensagem do tipo *response*. O módulo móvel a ser localizado recebe um *request*, processa-o e transmite o *response*. Cada SF regista os instantes de recepção do *request* e do *response*, procedendo ao cálculo de TDOA entre os sinais recebidos do CO e do módulo móvel (MM). O algoritmo consiste em relacionar os tempos adquiridos pelos SFs com os tempos de propagação conhecidos (t_c) entre o CO e cada SF, obtendo os tempos de transmissão (t_T) entre cada SF e o MM (equações 2.1 e 2.2).

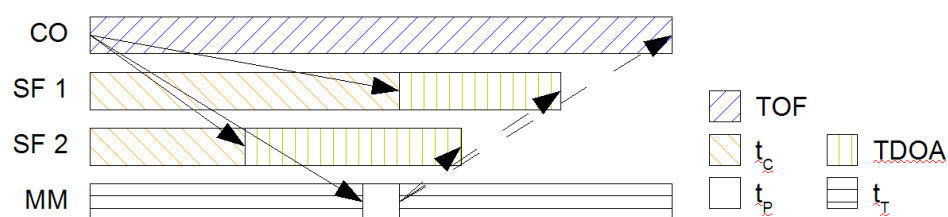


Fig. 2.1. DTDOA – esquema de tempos decorridos.

Diferenciando a expressão (2.2) para dois SFs, obtém-se uma expressão dependente apenas de valores conhecidos (2.3). Com 4 SFs é possível obter 3 valores de Δt_p linearmente independentes, a partir dos quais, e com conhecimento das coordenadas de cada SF, se constrói um sistema de 3 equações a 3 incógnitas. A resolução do sistema devolve as coordenadas do MM.

$$t_T(CO, MM) = \frac{TOF(CO) - t_p}{2} \quad (2.1)$$

$$t_T(MM, SF_i) = t_T(SF_i) + TDOA(SF_i) - [t_T(CO) + t_p] \quad (2.2)$$

$$\Delta t_T(SF_i, SF_j) = TDOA(SF_i) + t_c(SF_i) - [TDOA(SF_j) + t_c(SF_j)] \quad (2.3)$$

2.1.3. Observação do ângulo de recepção

A localização de objectos a partir da medição do valor de *Angle-Of-Arrival* (AOA) é um método menos preciso que os anteriores, mas que possibilita a determinação de posições a duas dimensões (2D) com apenas dois dispositivos receptores (DR) [2].

Os DR, dotados de *arrays* de antenas, identificam um sinal e o respectivo ângulo de chegada. Cruzando os valores de AOA, respeitantes ao mesmo *transceiver* móvel num dado instante, determina-se a posição da *tag* (pequeno transmissor móvel que se coloca em objectos afim de os seguir). Esta técnica (AOA) tem a vantagem de necessitar apenas de 2 pontos receptores de sinal, como se ilustra na figura 2.2, para localizar uma *tag* (duas rectas determinam um ponto), enquanto através da medição do tempo ou da força de sinal é necessário um mínimo de 3 pontos.

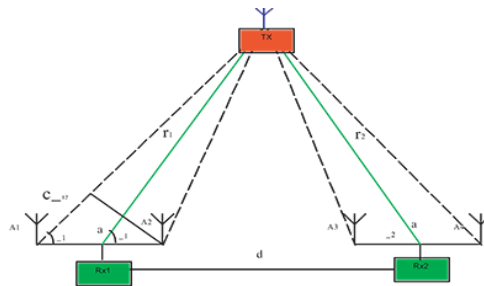


Fig. 2.2: Esquema demonstrativo da determinação do valor de AOA [3].

O *Ubisensor* [4], descrito em 2.2.5, dispõe de um *array* de 4 receptores UWB, desfasados entre si, permitindo a este a determinação do valor de AOA, relativo ao impulso UWB captado.

2.1.4. Medição da força de sinal recebido

Os sinais transmitidos por antenas sofrem atenuação durante o seu percurso, diminuindo a sua potência de forma proporcional à distância percorrida. Este é o conceito em que se baseia a técnica de localização com recurso ao *Received-Signal-Strength-Indication* (RSSI), parâmetro mensurável usado na estimativa da posição de um transmissor, a partir das coordenadas dos sensores que detectam e medem o sinal, e da relação entre distância e força de sinal recebido.

A técnica permite localizar um módulo móvel de uma forma directa, através das distâncias estimadas por três sensores, a partir dos valores de RSSI colectados. O cruzamento de três

circunferências, cada uma com centro num diferente sensor, delimita uma pequena área onde é maior a probabilidade de se encontrar o MM. Este método é designado por triangulação, neste caso de distâncias estimadas. Mas a força de sinal é uma variável instável, diferente para cada tecnologia ou ambiente de implementação do sistema, e como tal de processamento complexo, exigindo outros métodos para localizar um MM com exactidão.

A localização de dispositivos baseada em RSSI pode ser mais precisa quando realizada segundo o método de *fingerprinting*. Este método compreende duas fases. Na primeira, usualmente denominada por *offline*, os sensores procedem à aquisição de valores de RSSI correspondentes a locais definidos previamente, criando para o ambiente de implementação um mapa de “impressões digitais” – as *fingerprints* (FP). As FPs constituem uma base de dados (BD) do sistema com o valor de RSSI esperado a partir de cada ponto. Uma vez em funcionamento, fase denominada *online*, o sistema compara o valor médio de RSSI medido pelos receptores de uma dada área, com as FPs existentes na BD, determinando assim uma zona de maior probabilidade da presença do MM, processo designado por *matching*. A construção da base de dados de “impressões digitais” é um processo moroso, constituindo a maior desvantagem deste método. Existem sistemas onde as *fingerprints* criadas possuem apenas o valor de RSSI [5] e outros onde a *radio-signature* (RS) é composta por valores de *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) em conjunto com RSSI [6].

A localização baseada em RSSI pode ainda ser realizada com recurso a algoritmos designados por redes neuronais artificiais. Este método tem um procedimento semelhante ao anterior, compreendendo igualmente duas fases. Na primeira fase, designada por treino da rede neuronal, os sensores obtêm as RSSI *fingerprints* correspondentes a locais definidos previamente, e com elas treinam a rede neuronal. O algoritmo passa então a adaptar-se ao ambiente de implementação. Na segunda fase, designada por teste à rede neuronal, os sensores efectuem a aquisição de valores de RSSI e submetem estes à rede neuronal, que devolve a posição do respectivo MM à aplicação do sistema de localização.

2.2. Soluções de localização genéricas

2.2.1. Active Badge Location System

O *Active Badge Location System* (ABLS) [7] é um sistema de localização baseado na tecnologia de infravermelhos (IR). O protótipo, criado pela Olivetti Research Ltd. (ORL), em Cambridge, é composto por sensores IR de estado sólido (instalados nas paredes ou tecto de uma sala, piso ou edifício, formando assim uma rede de sensores), pelos *Active Badges* (AB) – dispositivos portáteis que emitem códigos por sinais IR e por um servidor de rede – unidade que processa, armazena e disponibiliza a informação de localização. O *Active Badge* (ilustrado na Fig. 2.3) não procede a cálculos de distâncias, nem interpreta características mensuráveis dos sinais transmitidos. A localização consiste apenas na identificação dos receptores que captam sinais de um determinado AB.

O ABLS é composto por sensores dispostos em células de número máximo igual 4, sendo cada célula gerida por uma *workstation*. Estes terminais comunicam entre si através de uma rede *Ethernet*, a mesma que os une à base de dados.

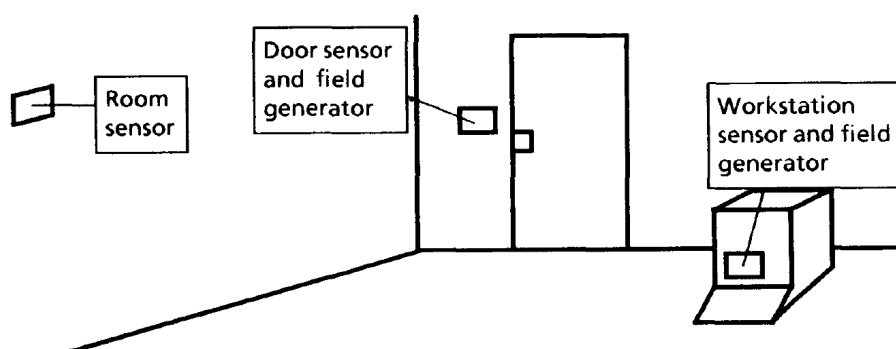


Fig. 2.3. Active Badge Location System: Rede de sensores IR (fonte [8]).

Modo de Operação

Os ABs enviam periodicamente um sinal IR, modulado em frequência, com o seu ID. Para minimizar a energia consumida, os períodos de transmissão são da ordem dos 15 segundos. Os sensores recebem este sinal e criam elementos numa base de dados, atribuindo ao ID recebido a informação de espaço e tempo. Cada *workstation* testa quais os sensores com informação para distribuir e recolhe os pacotes correspondentes. Posteriormente estes dados são processados, criando relatórios com o historial recente dos movimentos de cada AB, os quais são compactados, de modo a minimizar o tráfego na rede *Ethernet*. O sistema possibilita a visualização da posição gráfica dos AB sobre um plano de um piso do edifício, ou noutro formato criado pelo utilizador.

Características Técnicas

A eficácia deste sistema depende do grau de interferência (colisões) entre sinais. A duração da transmissão de um sinal é de aproximadamente 1/10 segundos, sendo que a probabilidade de dois sinais colidirem, em períodos de 15 segundos, é cerca de 2/150 [9]. Com o aumento do número de pessoas presentes numa área, este valor tem tendência a aumentar, diminuindo a eficácia do sistema. Para minimizar interferências de sinal, o oscilador foi desenhado com componentes de baixa tolerância (10%), o que inibe a sincronização no envio de *beacons* diminuindo a probabilidade de colisão entre dois sinais. De modo a evitar a espera de 15 segundos, para certas operações, pode ser adicionado um transceiver RFID [9].

Na tabela 1 está indicada a exactidão do sistema, que se resume à detecção de um *badge* por sensor. Faz-se também referência ao *buffer*, de capacidade até 20 entradas, suficiente para que o *master* tenha oportunidade de recolher todos os pacotes da rede sem riscos de perda de informação.

Tabela 1: Características do Active Badge [10].

| Frequência de Operação | IR: 333 THz ($\lambda = 900$ nm) RFID: 150 kHz (adicional) |
|--------------------------------------|--|
| Exactidão (repetibilidade) | Sala ou divisão |
| Interfaces do Active Badge | Foto-sensor |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | Cerca de 1 ano |
| Propriedades físicas do Active Badge | 55 x 55 x 7 mm; 40g; suporte clip |
| Miscellaneous | Buffer: 20 entradas |

Para ser localizado, o AB tem de estar situado à vista dos sensores que o irão detectar, não sendo detectável quando transportado num bolso. O AB é projectado com um suporte de clip para este efeito. Os sinais emitidos pelos ABs são reflectidos de forma muito dispersa e não atravessam barreiras físicas, minimizando o efeito dos caminhos múltiplos.

Os AB incluem um foto-sensor que desliga o próprio dispositivo quando em ambientes escuros, de modo a conservar a vida das pilhas. Os dispositivos de estado-sólido, emissores de IR, têm um custo inferior a dispositivos semelhantes de tecnologia de ultra-sons.

2.2.2. Active Bat - Ultrasonic Location System

Criado em 1997, pelo *Olivetti and Oracle Research Laboratory* (ORL), o *Active Bat* [11] surge como uma evolução do sistema anterior – o *Active Badge* – sistema que usa a tecnologia de infravermelhos para efectuar a localização de pessoas e objectos. O *Ultrasonic Location System* (UsLS) é composto por um conjunto de receptores, dispostos em matriz (ver Fig. 2.4), um PC que serve de unidade central do sistema, e por dispositivos móveis, os *Bats*, que são transportados por pessoas ou instalados nos objectos a localizar.

Cada *bat* é composto por um rádio-transceptor, um controlador Xilinx *field-programmable gate array* (FPGA), e um conjunto hemisférico de 5 transdutores de ultra-sons (US). Os receptores incluem igualmente um controlador Xilinx FPGA, um rádio-transceptor e um detector de ultra-sons (US). Este sistema tem como base as tecnologias de RF e US, a partir das quais usa o método *Time Difference-of-Arrival* (TDOA) para determinar distâncias. Os receptores estão ligados entre si e ao PC por uma rede cablada em anel, e usam a sua *serial network interface* (SNI) para se endereçarem ao PC.

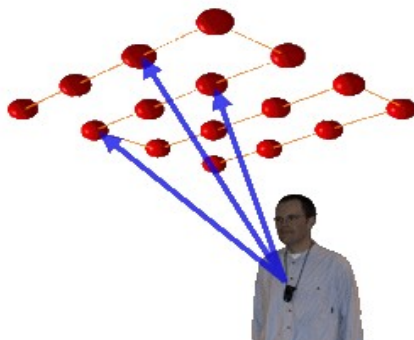


Fig. 2.4. Rede de sensores do sistema Active Badge [11].

Modo de operação

A cada 200 ms, os receptores enviam um sinal RF, endereçado pelo PC a um *Bat* específico. Este sinal é recebido pelos *Bats* ao seu alcance, decodificado pelo FPGA, e interpretado apenas pelo *Bat* de destino. Após a recepção da mensagem RF, este *Bat* inicia a emissão de ultra-sons, durante um período de 50 μ s. Os US são transmitidos em pulsos muito curtos, assegurando aos receptores a detecção de picos intensos (bem destacados). Os receptores “ouvem” o meio durante 20 ms, procedendo à digitalização do primeiro pulso intenso captado. É então criado um catálogo de ID e tempo de chegada, catálogo este que é posteriormente enviado ao PC através da rede cablada. A escolha do primeiro pulso não é mais do que a eliminação de sinais reflectidos, e a determinação do caminho mais curto. A posição de um *Bat* é determinada através

do tempo de viagem dos US (entre o *Bat* e os receptores), a partir do qual se calcula a distância correspondente. O cálculo é efectuado utilizando a velocidade do som no ar (à temperatura do ambiente nesse instante), e as posições são determinadas por triangulação.

No instante em que os receptores enviam um *request* a um *Bat*, o PC envia um sinal de *reset* aos receptores através da SNI, para que estes comecem a escutar US e parem ao fim de 20 ms. O PC realiza este controlo a cada 200 ms. Ao receber um sinal RF, o *Bat* inicia ou não (de acordo com o ID da mensagem) a transmissão de US e findo este processo entra em modo adormecido. Ao fim de 195 ms, o *Bat* reactiva-se para esperar um novo sinal RF. Este escalonamento de acções permite aumentar o tempo de vida das pilhas do *Bat* [11].

Características técnicas

O protótipo instalado no edifício da ORL está equipado com 16 receptores em matriz 4 por 4, de 4,8m de lado (16 quadrados de 1,2 m de lado), e opera num volume de 75 m³ (cerca de 25 m², para uma altura de 3 m). A posição de um *Bat* pode ser observada em tempo-real a partir de um modelo desenvolvido em *Virtual Reality Modeling Language* (VRML). A aplicação do sistema permite ainda efectuar buscas por característica (ou por um conjunto de características: hora, ID, área, etc.), obter gráficos de posição em função de uma ou mais características e comparar resultados em tabelas [12].

Tabela 2: Características do Active Bat [12].

| Frequência de Operação | RF: 418-433 MHz US: 40 MHz [11] |
|------------------------------------|---|
| Exactidão (repetibilidade) | 8 cm (95%) [11] |
| Interfaces do Active Bat | 2 botões; 2 LEDs; 1 microfone piezoeléctrico |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | Cerca de 3 meses |
| Propriedades físicas do Active Bat | 75 x 35 x 15 mm; |
| Miscellaneous | Location update rate: 5 aquisições/s |

As memórias implementadas nos *Bats* (com registos de 16 *bits*) permitem ao sistema localizar até 2¹⁶ *Bats* diferentes. Este número pode ser alargado alterando apenas as memórias, não esquecendo porém que o sistema pode localizar no máximo 5 objectos/s, e que em todos os casos o *Bat* necessita de estar à vista dos receptores (sem obstáculos a interferir).

2.2.3. 60 GHz OFDM Indoor Location System

O protótipo designado por *60 GHz OFDM Indoor Location System* [13] é um sistema de localização *indoor* baseado em comunicações na banda das microondas (60 GHz). O protótipo, projectado para apresentar um custo reduzido, foi realizado na Humboldt University Berlin (HUB), em parceria com o IHP – *Innovations for High Performance Microelectronics*, Frankfurt. Nesta solução aplicam-se técnicas de modelação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) aos sinais transmitidos, tornando este um equipamento de alta performance.

O sistema é composto por um PC de controlo (onde é efectuado o cálculo e registo de informação), por transceptores móveis (MT), e estações base (BS), uma *master BS* (MBS) e várias *slaves BS* (SBS), fixas no local de implementação. Os componentes da rede são dispostos

conforme a Fig. 2.5. A localização é baseada nas diferenças de tempo entre pedido e resposta – *Time-Difference-of-Arrival* (TDOA) – e determinada a partir do diferencial dessas diferenças – *Differential Time Differences Of Arrival* (DTDOA) [13].

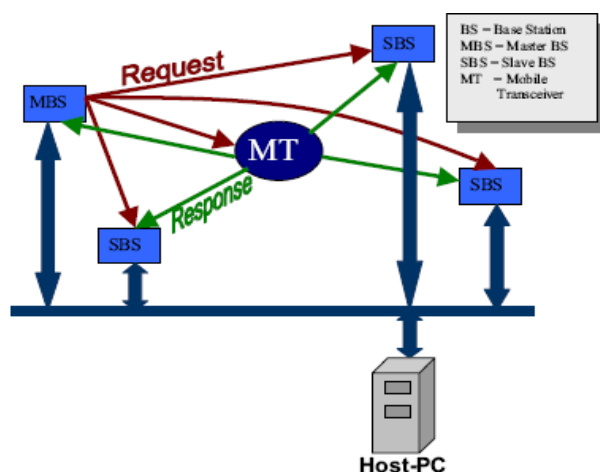


Fig. 2.5: Arquitectura do sistema de localização [13].

Modo de Operação

A MBS envia um *request* com uma sequência *pseudo noise* (PN) específica e conhecida pela rede. Este sinal é captado pelo MT e pelas SBS. Cada MT, ao receber a sequência PN vai produzir um *response* (reenvio da sequência PN). Quando a BS captura a resposta transmitida pelo MT, calcula a diferença temporal entre a recepção do pedido por parte da MBS e a resposta enviada pelo MT, enviando-a posteriormente para o PC. As BS não se encontram sincronizadas entre si, apenas registam os dois instantes segundo o seu próprio *clock* num processo sempre inicializado pela MBS (ver Fig. 2.5). O PC, conhecendo as posições de todas as BS (e portanto as distâncias e os tempos de propagação entre as mesmas), efectua o cálculo diferencial das diferenças de tempo medidas por duas BS, eliminando também o tempo de processamento do MT em causa. Desta forma, a partir de 4 BS é possível formar um sistema de 3 equações linearmente independentes, das quais se obtêm as 3 coordenadas cartesianas do MT.

A *Frequency Division Multiplexing* (FDM) é esquema de modelação digital onde um sinal de banda larga é dividido em muitos sinais de banda estreita, iguais entre si, com taxa de transmissão igualmente dividida, o que implica o aumento da duração de um símbolo. Como consequência directa, a dispersão de tempo resultante dos efeitos *multipath* é reduzida. Em FDM existe um intervalo de separação entre as bandas estreitas, de modo a evitar interferências entre bandas. A OFDM suprime estes intervalos otimizando assim a banda disponível, e elimina as interferências de sinal recorrendo à ortogonalidade das portadoras [14].

Características Técnicas

Os testes ao protótipo foram efectuados na seguinte configuração: uma MBS, cinco SBS e um único MT, em movimento aleatório. Com BS convencionais o erro obtido seria sempre superior a 2 m. Com as BS usadas, o protótipo obteve uma exactidão de um metro (sensivelmente) em 95% dos eventos, como vem referido na tabela 3.

Tabela 3: Características do OILS [13].

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Frequência de Operação | Microondas: 60 GHz |
| Exactidão (repetibilidade) | 1 m (95%) |
| Interfaces | - |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | - |
| Propriedades físicas | - |
| Miscellaneous | Taxa de amostragem: 400 MHz |

O valor da exactidão obtido verifica-se para vários *signal-to-noise ratio* (SNR), 10, 30 e 50 dB. Para um SNR de -10dB, a repetibilidade desce para 60%. Com sistemas mais complexos ou BSs de maior custo, este sistema pode obter um erro médio de 0.50 m. Este valor pode também ser alcançado recorrendo a um maior número de BSs.

2.2.4. Bluetooth Indoor Location System

O *Bluetooth Indoor Location System* (ILS) [15] é um sistema em tudo idêntico ao anterior, mas que usa tecnologia *Bluetooth*. A solução permite encontrar pessoas e objectos, monitorizando *tags* e *badges* activos. O sistema é composto por *Time Measurement Stations* (TMS), a *master* (MTMS) e as adicionais (ATMS); por *Mobile Bluetooth Devices* (MoBD); e por um PC que opera como a unidade de controlo do sistema, com se ilustra na figura 2.6. As TMS e o PC podem ser ligados entre si de forma cablada ou através de uma rede sem fios.

O cálculo da posição dos dispositivos móveis é baseada em DTDOA, não existindo a necessidade de sincronização das estações. O *Bluetooth ILS* é um sistema sensível a efeitos de *multipath*, susceptível portanto a situações de *jitter* ou erros de processamento de símbolos.

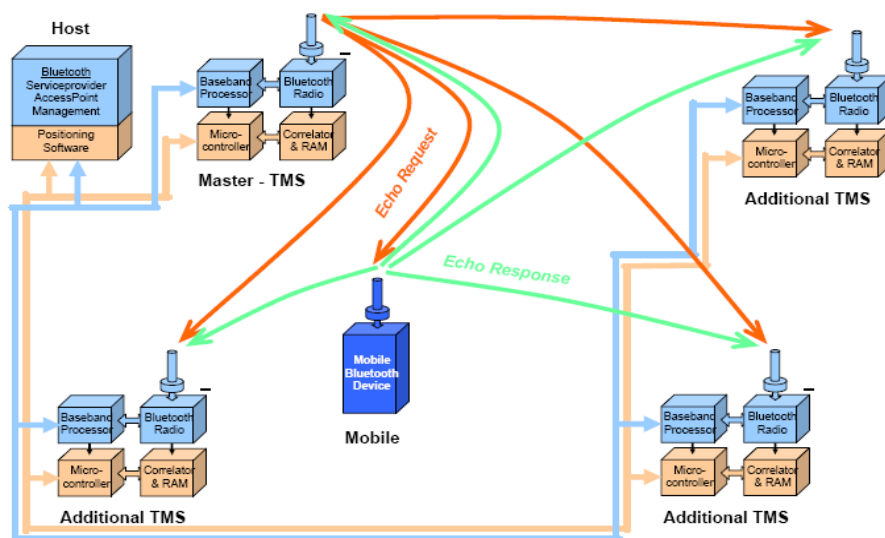


Fig. 2.6: Vista geral do sistema Bluetooth ILS [15].

Modo de Operação

As TMS são fixas nos cantos superiores de modo a reduzir as consequências do efeito *multipath* e de minimizar a ocorrência de *non-line-of-sight* (LOS). A rede é instalada em células de

7 ATMS e 1 MTMS – as *piconets*. Em cada *piconet*, a MTMS faz o início da contagem enviando um *Echo request* para o meio. As ATMS capturam este disparo iniciando a contagem (de tempo) no seu *clock* interno. Cada MoBD, no alcance da MTMS, processa este disparo e responde transmitindo um *Echo response*.

A diferença entre dois valores de TDOA, provenientes de duas ATMS diferentes, é um valor que já não inclui o tempo inicial (registado pela MTMS), nem o tempo de processamento do MoBD (ver Fig. 2.6). Multiplicando a diferença de tempo pela velocidade da luz, e subtraindo as distâncias exactas entre cada ATMS e a MTMS (conhecidas *à priori*) determina-se a diferença das distâncias entre o MoBD e cada ATMS (secção 2.1.4.). A posição de um MoBD é posteriormente determinada por triangulação destas diferenças. O algoritmo prevê a obtenção de 3 diferenças de tempo, correspondentes a 4 TMS não coplanares (sendo uma a MTMS), como o mínimo requerido para a localização de um dispositivo móvel.

Características Técnicas

O efeito *multi-path* reduz consideravelmente a performance do sistema, sendo portanto necessário um ambiente LOS para que o sistema funcione correctamente [15].

Neste protótipo foram usadas antenas omni-direccionais, captando assim todos os sinais e suas reflexões, o que constitui uma desvantagem. Se estas forem substituídas por antenas direccionais, os efeitos *multipath* serão consideravelmente reduzidos.

Tabela 4: Características do BILS (HUB/IHP) [15].

| | |
|----------------------------------|--|
| Frequência de Operação | Bluetooth: 2.4 GHz |
| Exactidão (repetibilidade) | 1 m (95%) |
| Interfaces | - |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | - |
| Propriedades físicas | - |
| Miscellaneous | ATMS – Medidas efectuadas: 10/s MoBD – Taxa de Transmissão: 1.6 MHz |

Para obter a exactidão apresentada na tabela 4 é exigido que o sistema esteja abilitado para medir tempos na ordem dos 3 ns. Este valor é conseguido através de um circuito integrado *cross correlation* [15]. Este circuito integrado efectua, em tempo-real, a correlação cruzada de sinais recebidos, através de sequências PN, determinando o tempo da recepção de cada um com um grau elevado de exactidão. Cada medida corresponde a uma amostragem de 64 milhões de sinais captados [15].

2.2.5. Parco Real-Time Location System

O *Real-Time Location System* (RTLS) da Parco Merged Media Corp. [16] é um sistema de monitorização de pessoas e objectos, desenhado para operar em ambiente hospitalar. Entre outras funções, o sistema gere o percurso de um paciente, optimizando os serviços a este prestados, conforme as disponibilidades instantâneas de recursos humanos e materiais. Esta solução utiliza novos componentes electrónicos de tecnologia UWB [18], e surge no sentido de substituir soluções semelhantes baseadas em IR/RFID [17], oferecendo ao meio hospitalar uma maior eficiência.

A infraestrutura é composta por *Access Points* UWB¹ e por leitores RFID, e é controlada pelo *Synchronization Distribution Panel* (SDP)¹. Estes dispositivos encontram-se ligados por uma rede *Ethernet*, como ilustrado na figura 2.7. Os APs medem o *Time-of-Arrival* (TOA) dos impulsos UWB transmitidos pelas UWB tags (*Personnel Badge* e *Asset Tags*), enquanto os leitores RFID detectam a presença ou passagem de pacientes na sua área, por intermédio de pulseiras RFID (*Patient Wristband*). A solução calcula valores de distâncias a partir da medição de TOA, e determina as posições das *active tags* através da triangulação dos valores obtidos.

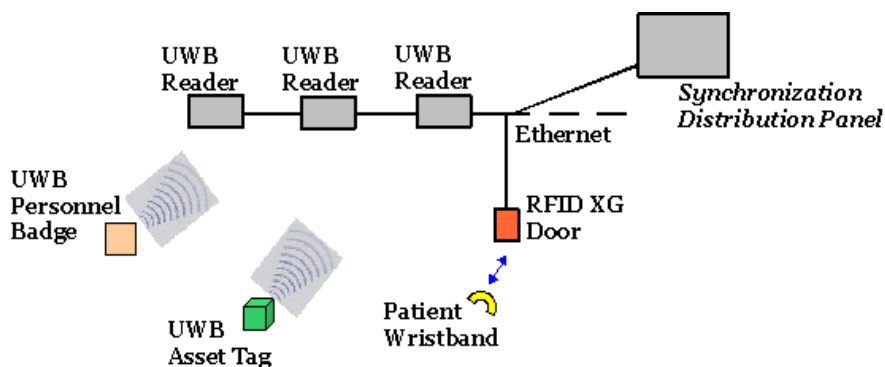


Fig. 2.7. Vista geral do sistema de localização da Parco.

Modo de Operação

No centro hospitalar são instalados os leitores UWB, com funções de *Access Point* (AP). As tags previamente instaladas nos objectos ou transportadas por pessoas, emitem impulsos UWB. Estes impulsos são recebidos pelos leitores UWB, que procedem à sua identificação e registam o tempo de chegada. Este tempo é posteriormente enviado a uma unidade de controlo (UC) onde os dados são processados e a localização da tag é determinada com base no tempo registado por 3 ou mais leitores UWB. O SDP, módulo incluído na UC, efectua a sincronização dos dispositivos UWB e transmite à rede local os valores de TOA provenientes dos leitores UWB. A localização das tags é determinada na UC a partir da triangulação dos valores de TOA. As tags emitem impulsos em instantes aleatórios havendo lugar para colisões entre transmissões. A probabilidade deste evento depende do número de tags activas numa determinada área, número este que não deve exceder as 2000 [16].

O software da Parco, *Parco API Software Suite* [16], inclui aplicações de visualização do *staff*, de pacientes e de equipamentos médicos em tempo-real. Permite também efectuar análises estatísticas e criar outras aplicações com funções suportadas pela API.

Características Técnicas

A solução inclui tags pessoais e para objectos. Para que o sistema opere correctamente, um aumento de Personnel Tags (PT) implica um maior incremento de *Wall Mounted Receivers*, face ao mesmo aumento em Asset Tags (AT) [16, 18]. Embora sejam muito idênticas, as PT têm o dobro da largura de banda relativamente às AT (~1250 MHz para ~650 MHz) pelo que o seu alcance pode atingir até 4 vezes o das AT. A tabela 5 apresenta algumas das características dos dispositivos. A Parco disponibiliza ainda um *Handheld Reader* (leitor portátil) que possibilita a localização de todas as tags num raio de 180 m.

1. Hardware PulsOn – transceptores UWB de baixo consumo – da Time Domain Corporation [18].

Tabela 5: Características do RTLS da Parco [18].

| | |
|------------------------------------|---|
| Frequência de Operação | UWB: 5751- 7001 MHz |
| Exactidão (repetibilidade) | 30 cm (95%) |
| Interfaces da <i>tag</i> | 4 botões |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | - |
| Propriedades físicas da <i>tag</i> | 25 x 25 x 13 mm; 7 g |
| Miscellaneous | Taxa de amostragem: programável de 1000/s a 1/dia (standard: 1/s) |

2.2.6. Ubisense – Local Positioning Systems

O *Ubisense* [19] é uma solução de localização em tempo-real, desenhada para suportar inúmeras aplicações de forma integrada, em ambientes amplos e com muitos utilizadores. O sistema é composto por uma rede de sensores – os *Ubisensors* – fixos em posições pré-determinadas, em agregados (células) de 4 a 7 sensores, ligados entre si por *Ethernet*. Os *Ubisensors*, equipamentos de tecnologias RFID e UWB, baseam-se na combinação das técnicas TDOA e AOA para efectuar a localização de *tags* móveis – as *Ubitags*, como se ilustra na figura 2.8. A escolha de tecnologias visa obter um sistema de localização com resolução fina que funciona em ambiente de *non-line-of-sight* (NLOS). A cobertura do espaço a monitorizar é assegurada área a área, por células de *Ubisensors*.

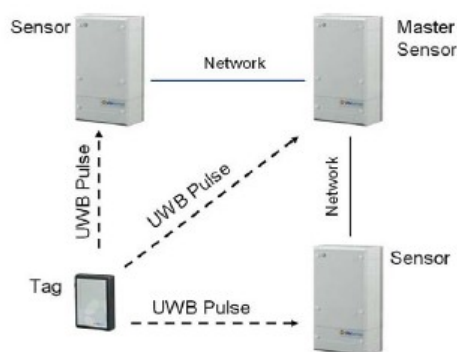


Fig. 2.8: Rede de Sensores do sistema Ubisense [19].

O *Local Position System* (LPS) da Ubisense é um sistema composto por objectos, suportados pela plataforma de gestão do sistema – a *Ubisense Software Platform* (USP), permitindo a integração de diferentes tecnologias e protocolos de comunicação. A USP inclui uma biblioteca de funções (API), facilitando assim a criação de rotinas para uma operação centralizada do LPS.

O sistema é dotado de software que permite a visualização 2D e 3D dos objectos monitorizados e o acesso às suas propriedades. Permite ainda estabelecer relações entre objectos, efectuar pesquisas por classes, realizar testes de conectividade, criar perfis para cada identidade (monitorizada) e simular, em tempo-real, o caminho mais curto para alcançar a mesma [4].

Modo de Operação

As *Ubitags* transmitem simultaneamente uma sequência de impulsos UWB e uma mensagem RF com a sua identificação, sinais estes que são captados e interpretados pelos *Ubisensors*. Em cada célula de sensores existe um que opera como *master*, controlando o acesso das *Ubitags* à célula por *Time Division Multiple Access* (TDMA). Os *Ubisensors*, dotados de *arrays* de antenas, identificam o sinal RF e o ângulo de recepção do impulso UWB, registando ainda o tempo de chegada deste último. O *master* determina o TDOA para cada *Ubisensor*, respeitante à mesma *Ubitag*, e envia todos os dados (ID, AOA, TDOA) à USP. Na USP, os valores de TDOA são convertidos em distâncias, a partir das quais, por triangulação, é determinada a posição de uma *tag*. Em qualquer situação, a localização também pode ser determinada a partir do cruzamento dos valores de AOA, sendo que este método necessita apenas de 2 pontos receptores de sinal para localizar um ponto, enquanto o primeiro só é possível com 3 valores de TDOA.

A informação gerada pelo LPS é distribuída aos utilizadores do mesmo, dependendo das suas permissões de acesso. Através da USP, os utilizadores podem programar todos os dispositivos, atribuir características às *Ubitags* e alterar as permissões de acesso de cada utilizador à informação afecta a estas, cumprindo desta forma as regras de sigilo e privacidade a que estes sistemas devem estar sujeitos.

Características Técnicas

Cada *Ubisensor* possui um transceptor RF convencional e um *array* de antenas (receptores UWB). Por sua vez, as *Ubitags* possuem um transceptor RF e um transmissor UWB. As definições da *Ubitag* podem ser alteradas (por exemplo, os períodos de transmissão) permitindo um menor consumo de energia quando tal for proveitoso. Através do canal RF bi-direccional, é possível programar a *tag*, agendando as tarefas que esta vai executar e alertas que irá transmitir. A *Ubitag* possui ainda uma fonte sonora de alarme ao portador. Na tabela 6 são apresentadas as características técnicas da solução.

Tabela 6: Características do Ubisense [19].

| | |
|---|--|
| Frequência de Operação | RF (seleccionável): 433-434, 869-870, 902-928 MHz UWB: 5.8- 7.2 GHz |
| Exactidão (repetibilidade) | 30 cm (95%) |
| Interfaces da <i>Ubitag</i> | 2 botões, 2 LEDs; 1 <i>bleeper</i> (<i>buzzer I/O</i>) |
| Tempo de vida das pilhas (<i>tag</i>) | 1 ano |
| Propriedades físicas da <i>tag</i> | 5,8 x 9,2 x 1,0 cm; 50 g |
| Miscellaneous | Taxa de amostragem: programável de 1000/s a 1/dia (standard: 1/s) |

2.2.7. PanGo Integrated Asset Tracking Solution

A *PanGo Integrated Asset Tracking Solution* (IATS) [20] é uma solução tecnológica de localização de bens em tempo-real, que opera sobre uma infraestrutura *wireless* LAN (IEEE 802.11b), através de uma plataforma de controlo do sistema e de centralização de informação, a

PanOS Platform® [20], ou a *Cisco Wireless Location Appliance*® [21]. Este equipamento combina um *WiFi Real-Time Location System* (RTLS) baseado *RSSI fingerprinting*, e um sistema RFID de detecção de eventos.

O sistema, ilustrado na figura 2.9, é constituído por um conjunto de *WiFi active RFID tags*; uma rede de *WiFi Access Points* (AP) que medem a *RSSI* dos sinais transmitidos pelas *tags*; receptores RFID que detectam eventos (ex: o atravessar de uma porta); uma plataforma de controlo, e a aplicação de visualização de dados, *PanGo Locator*® [20].

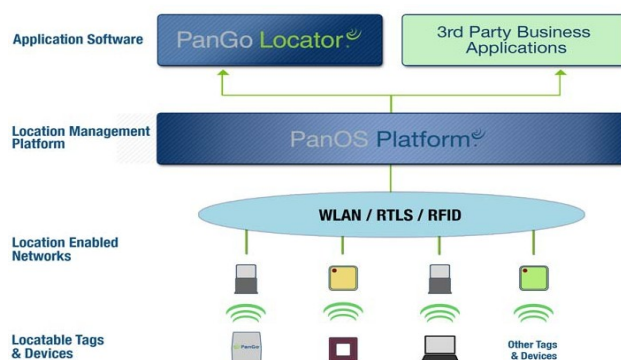


Fig. 2.9: Vista geral do RTLS da PanGo [20].

A *PanGo IATS* permite às organizações transformar uma rede *wireless* comum numa plataforma de aplicações inteligentes que permite melhorar o desempenho dos seus processos funcionais. É uma solução de localização industrial completa com distribuição instantânea de informação contextualizada em qualquer lugar ao alcance da rede 802.11b.

Modo de Operação

A IATS efectua o registo e a monitorização dos movimentos de pessoas e objectos da seguinte forma: os APs captam os sinais provenientes das *tags* (ou outras estações *WiFi*, como PDAs ou Laptops) medindo o *RSSI* das mesmas. Estes valores são enviados para a plataforma de localização e controlo (a *PanOS Platform*® ou a sua homóloga da Cisco), que por sua vez faz a comparação dos valores de *RSSI* adquiridos com as entradas da base de dados associada ao local da medição. Após a determinação da posição de uma estação móvel, a sua localização é devolvida à própria. Os utilizadores do sistema poderão, a partir desta fase, monitorizar pessoas e objectos a partir de qualquer computador ligado à rede, ou através de uma unidade central que pode ser operada remotamente, por extensões standard como o HTTP.

Para as referidas plataformas de localização e controlo, a localização de uma *tag* (ou outras estações *WiFi*) com a boa precisão (ver 5.2.2.) exige a detecção da mesma por um mínimo de 3 APs, com potências acima dos -75 dBm (32 nW).

Características Técnicas

As aplicações incluídas no sistema permitem visualizar objectos em mapas, efectuar buscas individualizadas por objecto e buscas filtradas por classes, disponibiliza listas de objectos inseridos na base de dados e mostra as características de um objecto seleccionado no mapa. Permite ainda configurar diferentes ícones para as entidades monitorizadas, de modo a visualizar o movimento (ou simplesmente a presença) destas em mapas mais ilustrativos.

O sistema tem capacidade de envio de alertas relacionados com eventos como o excesso de tempo em certos locais, espaços não permitidos a determinado objecto, falta de bateria, entre outros. Permite ainda programar eventos adicionais, ao nível do tratamento de dados e do seu envio periódico para qualquer unidade do sistema (*3rd Party Business Applications*, Fig. 2.9). Os dados tratados podem também ser requeridos remotamente, sendo que o acesso a estes está dependente das permissões do utilizador.

Na tabela 7 vêm indicadas algumas das características técnicas que a solução apresenta.

Tabela 7: Características da PanGo's V3 Tag [20].

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Frequência de Operação | WiFi: 2.4 GHz |
| Exactidão (repetibilidade) | ~3 m (95%) |
| Interfaces da tag | 1 botão |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | 2 a 5 anos |
| Propriedades físicas da tag | 6.35 x 4.32 x 1.78 cm |
| Miscellaneous | Alimentação: 1 pilha AA |

2.2.8. Ekahau Real-Time Location System

O RTLS da Ekahau [22] é mais uma solução de localização de pessoas e bens, e de acompanhamento das suas trajetórias a suportar-se na medição de RSSI em redes *WiFi* (IEEE 802.11). A infraestrutura do RTLS, composta por *WiFi* APs, comunica com as *WiFi* tags e outros clientes 802.11, como ilustrado na figura 2.10. O RTLS inclui ainda o *Ekahau Position Engine*® (plataforma de localização) e dois programas de monitorização de objectos, o *Ekahau Finder*® e o *Ekahau Tracker*®.

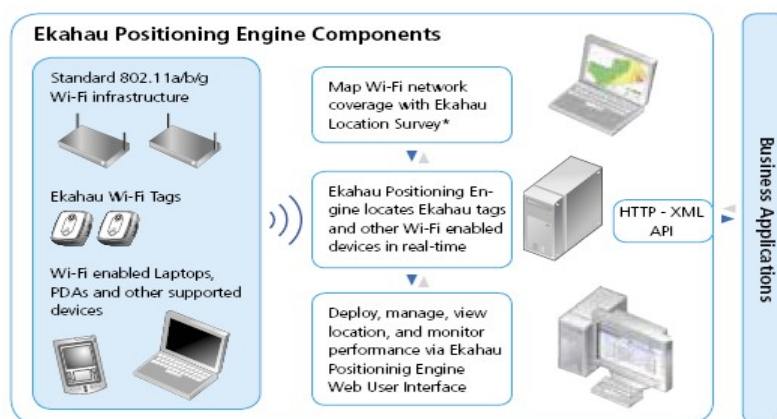


Fig. 2.10: Vista geral do RTLS da Ekahau [22].

Este sistema usa, tal como o anterior, a infraestrutura *WiFi* já instalada, assumindo-se, desta forma, atractivo em termos financeiros. Esta utilização é feita sem prejuízo do normal funcionamento das comunicações comuns, garantindo que as actividades de rotina de uma organização que operam sobre a rede *WiFi* não são interrompidas pelo sistema de localização. As funções de localização permitem poupar tempo na procura de equipamento e aumentar a rentabilidade dos recursos da organização. O Ekahau RTLS é um sistema robusto e completo, que possui ainda capacidades de teste e de configuração automática.

Modo de Operação

Este sistema suporta-se em comunicações RF a 2,4 GHz entre AP e *tags*, através das quais se mede a força do sinal na recepção. Neste sistema é a *tag* que mede a força dos sinais emitidos pelos AP. Posteriormente, a *tag* comunica os valores de RSSI à rede. Estes valores são enviados para o *EkaHau Position Engine*®, que procede ao cálculo da posição da *tag* a partir das distâncias estimadas com base em RSSI. Este método permite uma boa exactidão na estimativa da posição, embora dependa da ausência de obstáculos. O RTLS actualiza constantemente a posição dos dispositivos monitorizados, armazenando esta informação numa base de dados que é disponibilizada aos utilizadores da rede autorizados para o efeito. Assim, cada utilizador tem acesso à informação, com maior ou menor detalhe, de acordo com as suas permissões.

Características Técnicas

A informação de localização pode ser obtida por solicitação ou de forma automática, dependendo das configurações da aplicação. Outra potencialidade do sistema é a função de alarme à área de segurança, indicando a ocorrência de eventos (ex.: uma *tag* foi desacoplada do objecto afecto, ou que o botão da mesma foi pressionado). Estas funções, em conjunto com a localização em tempo-real, permitem à equipa de segurança agir em conformidade e em tempo útil. Na tabela 8 são apresentadas as características deste RTLS.

Tabela 8: Características do sistema RTLS da EkaHau [22].

| Frequência de Operação | WiFi: 2.4 GHz |
|------------------------------------|---|
| Exactidão (repetibilidade) | ~2 m (95%) |
| Interfaces da <i>tag</i> | 2 botões e 2 LEDs |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | 2 a 5 anos |
| Propriedades físicas da <i>tag</i> | 45 x 55 x 19 mm |
| Miscellaneous | Receptor: 2 antenas omnidireccionais |
| | Alcance indoor: 40 m (11Mb), 60 m (2Mb) |

2.2.9. Exavera eShepherd™

O *Exavera eShepherd*™ [23] é uma solução *wireless* criada para o contexto hospitalar com o objectivo de localizar pacientes, *staff* médico e material crítico (equipamentos médicos portáteis). Esta plataforma combina as tecnologias RFID e *WiFi*. A primeira é usada na identificação e localização, a segunda apenas para acesso à informação. O sistema é composto por pulseiras (*Vera-T Bracelets*), cartões (*Staff Badges*) e *Asset tags* de tecnologia RFID, e por uma infraestrutura *WiFi*, como ilustrado na figura 2.11. A solução inclui ainda um sistema de informação hospitalar (HIS), a instalar num PC (servidor e unidade de controlo).

O HIS armazena e centraliza toda a informação logística e administrativa, processos clínicos e outros dados. A par destas valências, o sistema assegura ainda a distribuição de informação aos utilizadores que a solicitarem, em qualquer ponto de acesso à rede, a partir de equipamentos *WiFi* (*PDA*, *laptop*), desde que devidamente autorizados para o efeito.

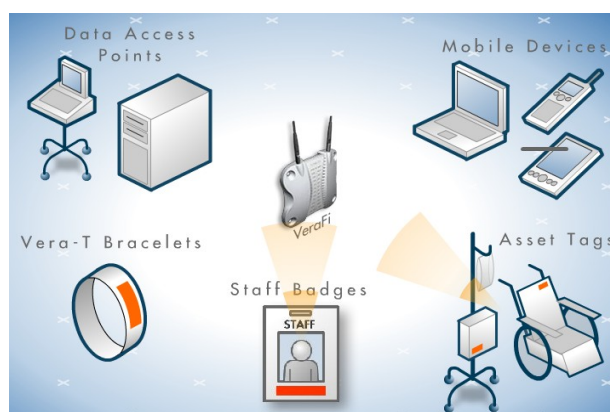


Fig. 2.11: Componentes do sistema Exavera eShepherd™ [23].

Modo de Operação

A infraestrutura é constituída pelos *Vera-Fi* (dispositivos leitores de RFID e *WiFi* APs) e pelos *Relay RFID Transceivers* (RRT) – nodos de reencaminhamento de pacotes. Por estações móveis (EM) entendem-se as *Asset Tags* (colocadas em objectos), os *Staff Badges* (que acompanham médicos e enfermeiros) e as *Vera-T Bracelets* (usadas por pacientes). As EMs enviam periodicamente sinais RFID, que são captados e identificados pelos *Vera-Fi* ao alcance dos sinais das EMs. Estes eventos são registados e enviados pela rede até ao HIS, a partir do qual é possível conhecer a área onde se encontram as EM, em cada instante.

Através das aplicações *Vera Services™* [23] é possível aceder à informação do HIS e até visualizar e monitorizar pessoas e equipamentos médicos através de interfaces gráficas.

Características Técnicas

Os ARP têm a capacidade para detectar 2500 dispositivos *Vera-T* em simultâneo. Na tabela 9 são apresentadas as características de operação do sistema da Exavera. A solução foi testada em ambientes com obstáculos físicos e humanos, revelando-se eficiente neste contexto – *non-line-of-sight* (NLOS).

Tabela 9: Características dos dispositivos Exavera [24].

| | |
|----------------------------------|----------------------------|
| Frequência de Operação | WiFi 802.11 a/b/g: 2.4 GHz |
| Exactidão (repetibilidade) | ~3 m (95%) |
| Interfaces da tag | - |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | - |
| Propriedades físicas da tag | 54 x 33 x 15 mm; 20 g |
| Miscellaneous | - |

2.2.10. AeroScout Visibility System

O *Visibility System®* (VS) [25] é um sistema de localização de pessoas e objectos em tempo-real, baseado no cruzamento de valores de TDOA e RSSI. As suas funcionalidades assentam na tecnologia *WiFi active* RFID, oferecendo funções de telemetria e de segurança crítica. A solução, já usada em indústrias e hospitais, está preparada para detecção imediata de qualquer

obstrução ao normal funcionamento dos processos, com aplicações desde a gestão de stocks à segurança e prevenção.

O *Visibility System*® suporta-se numa infraestrutura *WiFi active* RFID (ver Fig. 2.12), com a qual comunicam dispositivos *WiFi* (*tags*, PDAs, *laptops*, etc.). O sistema é controlado por uma plataforma que inclui o *Aeroscout Engine*® (*software* de determinação da localização), e a aplicação de visualização de dados – *Aeroscout MobileView*®. Esta plataforma permite a integração de outros dispositivos e de outras tecnologias, fazendo uso da própria API. Um exemplo desta capacidade é a integração dos *Aeroscout Exciters*®, dispositivos RFID que detectam a passagem de *WiFi active* RFID *tags*.

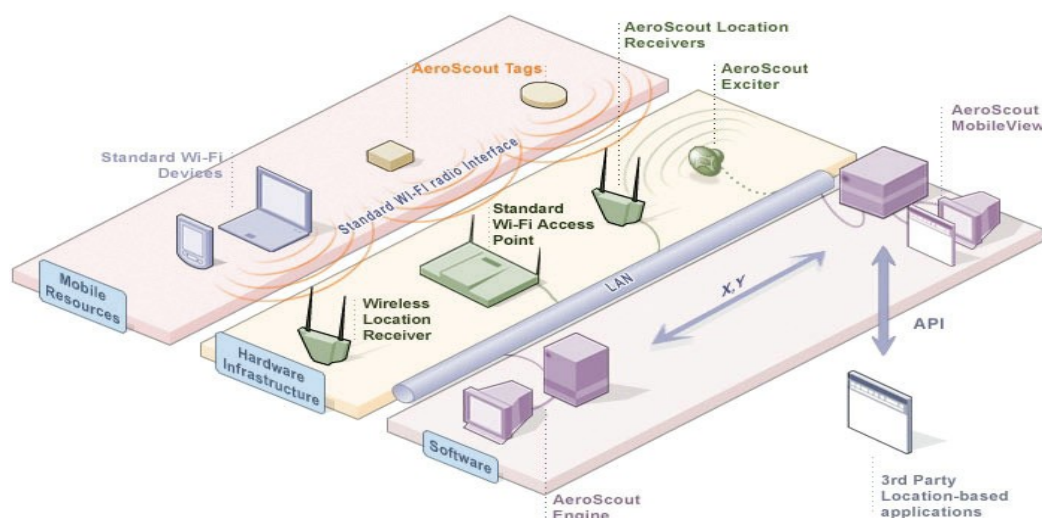


Fig. 2.12: Vista geral do *Visibility System* [25].

Modo de Operação

Os vários receptores *Aeroscout* e *WiFi Access Points* integrados na rede local (Fig. 2.12) captam sinais das estações móveis (*tags*, PDAs, *laptops*, etc.), e medem a RSSI. Os receptores *Aeroscout* conseguem também medir o TDOA, necessitando para tal que todos os dispositivos envolvidos se encontrem sincronizados. Estes dados são enviados ao *Aeroscout Engine*® através da rede local, para serem processados e arquivados. A aplicação determina a localização das EMs usando algoritmos que atenuam o efeito *multi-path*, e distribui a informação gerada aos utilizadores da rede local.

O *Aeroscout Visibility System*® pode ser operado pela *Wireless Location Appliance*® [21] da Cisco, unidade compatível com todos os módulos da *Aeroscout*. O *Aeroscout Engine*® permite a integração de outras tecnologias no VS, bem como a instalação de outro *software* (usando funções da própria API). Permite ainda efectuar de forma simples a instalação, configuração e manutenção do sistema. Os *Aeroscout Exciters*® captam respostas RFID, detectando a passagem de uma *tag*. Conforme configurados, os *Exciters*® podem emitir alertas, ou simplesmente informar a rede da presença de uma *tag* na sua área. O *Aeroscout Mobile View*®, aplicação que corre sobre o localizador, acede ao sistema de informação disponibilizando várias opções: efectuar buscas, obter relatórios, programar a recepção e/ou o envio de alertas e visualizar utilizadores em mapas.

Características Técnicas

O *Aeroscout Visibility System*® apresenta diferentes desempenhos em função de algumas características: ambiente *indoor* ou *outdoor*, ruído ambiente, entre outros. Na tabela 10 vem apresentada a exactidão do sistema, que varia com os factores supracitados.

A rede *WiFi* pode ser composta apenas por AP, por receptores *Aeroscout*, ou por ambos. A esta rede podem ser ainda acrescentados detectores de passagem, os *Aeroscout Exciters*. A tabela apresenta as características de operação do sistema de localização da *Aeroscout*.

Tabela 10: Características do *Aeroscout Visibility System* [25].

| | |
|--|--|
| Frequência de Operação | WiFi 802.11 b/g: 2.4 GHz |
| Exactidão (repetibilidade) | TDOA: 3 a 5 m (95%) RSSI: 3 a 10 m (95%) |
| Interfaces da <i>tag</i> | 2 botões; 2 LEDs; interface IR (<i>firmware upgrade</i>) |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | cerca de 4 anos |
| Propriedades físicas da <i>tag</i> | 74 x 50 x 10 mm |
| Miscellaneous (Receptores <i>Aeroscout</i>) | RJ-45 10/100 <i>Ethernet</i> ; Conectores SMA; 2 antenas omnidireccionais de 2 dBis |

A *active RF T3 tag* pode ainda ser programada para enviar e receber alertas. Para visualizar alertas recebidos, a *tag* possui dois LEDs, para enviar alertas a *tag* dispõe de dois botões. Por infravermelhos é ainda possível actualizar o seu *firmware*. A *tag* inclui ainda um sensor de movimento para indicação de situações estáticas, nas quais o transceptor é desligado de forma a diminuir o consumo da pilha. O *transceiver WiFi* da *active RF T3 tag* tem a capacidade de aumentar o sucesso na transmissão através da propriedade *Clear Channel Sensing Avoids Interference / Wireless Networks*.

2.3. Sistemas baseados em RSSI sobre IEEE 802.15.4 / ZigBee

2.3.1. Indoor Local Positioning System For ZigBee, Based on RSSI

No projecto *Indoor Local Positioning System For ZigBee, based on RSSI* [5] foi desenvolvido um sistema de localização e monitorização de movimentos, que actua sobre uma rede de sensores sem fios, com base na medição de *Received-Signal-Strength-Indication* (RSSI) com tecnologia *ZigBee* (IEEE 802.15.4). A rede é composta por vários *End Devices* (dispositivos a localizar: computador, PDA, etc.); um *Coordinator*, que gere toda a rede de sensores; e 4 *Routers*, que captam os sinais dos *End Devices* (EDs) e medem os respectivos valores de RSSI. Na figura 2.13 é ilustrada a implementação do protótipo. A localização de EDs efectua-se pelo método de *fingerprinting* (FP), obtendo o ponto onde a probabilidade de este se encontrar é maior. Dada a incerteza no processo de determinação de valores RSSI, o *matching* indica apenas que o ED estará próximo do ponto atribuído.

Todos os dispositivos usados nesta solução, para qualquer uma das funções acima descritas, são baseados em plataformas SENTIO [26].

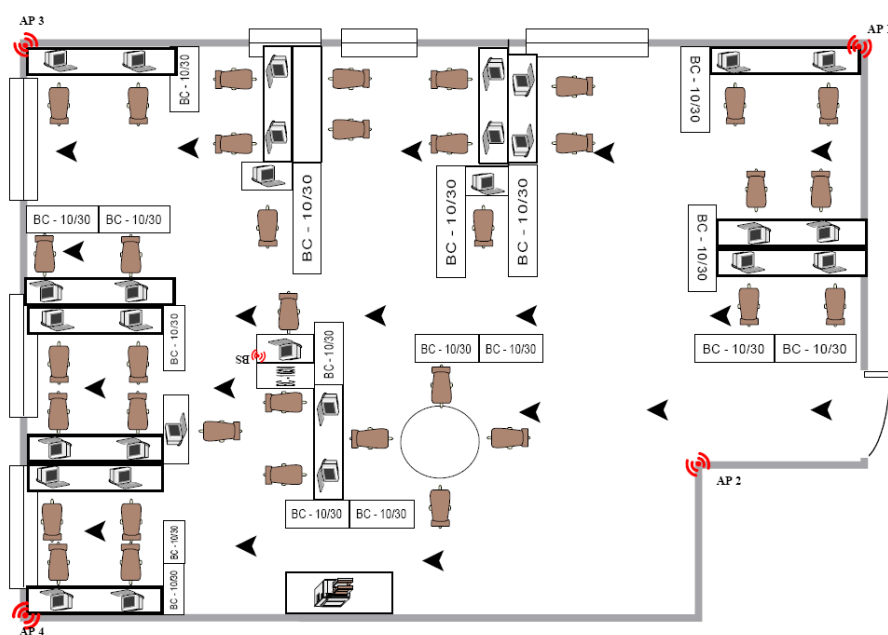


Fig. 2.13: Sistema implementado na Master's room, Mid Sweden University [5].

Modo de Operação

Na primeira, denominada *offline*, são determinados os locais onde se pretende obter uma FP, tendo em conta a exactidão e o intervalo de confiança pretendidos para o sistema. Depois de colocados os *Routers* em cantos opostos, estes vão captar sinais *ZigBee* provenientes de um ED colocados nos locais referidos, medindo o valor de RSSI correspondente a cada local. Este valor é posteriormente enviado para a base de dados (BD) produzindo assim um mapa RF do local em estudo. Ainda nesta fase são medidas as distâncias dos pontos escolhidos a um ponto de referência, valores que serão também inseridos na BD para figurar ao lado do RSSI correspondente. Na segunda fase, denominada *online*, o teste é feito com vários *End Devices*. Os *Routers* voltam a medir o valor RSSI dos sinais captados e devolvem o valor medido ao *End Device* que o transmitiu. Este, por sua vez, cria um vector RSS (*Received-Signal-Strength*) – vector de 4 coordenadas RSSI correspondentes a cada *Router* – que é depois enviado ao sistema de informação (SI). Comparando este vector com a BD, e aplicando o *Euclidean algorithm* [5], o SI estima as coordenadas do ED. Estes registos são acrescentados à BD com o objectivo de aumentar o detalhe do mapa RF.

Uma vez o ILPS em funcionamento, os *Routers* recebem sinais dos EDs. Após receber 50 transmissões de um ED, cada *Router* efectua o cálculo da média dos respectivos valores RSSI, e envia este resultado para o SI. Este último constrói um vector RSS que será comparado com a BD. O *matching* inclui o cálculo de coordenadas cartesianas segundo *Euclidean algorithm*. A localização do ED pode ser visualizada sobre a imagem de uma planta do espaço, ou simplesmente em tabela de coordenadas cartesianas relativas ao mapa RF, dependendo da aplicação do sistema.

Características Técnicas

A disposição dos *Routers* é um factor importante para o bom desempenho do sistema, sendo referida uma distância média de 10 m entre estes para um desempenho óptimo. Outros aspectos a salientar são as variações de sensibilidade do receptor e do transmissor, a orientação da

antena, ou os efeitos de interferência na propagação das ondas, aspectos que também influenciam o RSSI. Na tabela 11 são apresentadas características técnicas do protótipo testado na *Master's room, Mid Sweden University*.

Tabela 11: Características do ILPS [5].

| | |
|----------------------------------|---|
| Frequência de Operação | ZigBee: 2.4 GHz ISM |
| Exactidão (repetibilidade) | 3 m (35%) |
| Interfaces da SENTIO | 2 botões de alarme 2 LEDs sinalizadores [26] |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | - |
| Propriedades físicas da SENTIO | 30 x 50 x (~10) mm [26] |
| Miscelaneus | Transceiver: Chipcon CC2420 |

O RSSI *fingerprinting* caracteriza-se pela comparação cruzada de dados obtidos *online* com dados obtidos *offline*, permitindo atenuar efeitos de *non-line-of-sight* (NLOS). A grande desvantagem dos métodos FP, como referido anteriormente, é a criação da base de dados cujo processo é significativamente moroso.

2.3.2. Projecto LOPES – Localização de PESSOAs

O Projecto LOPES, já referido no capítulo 1, tem como objectivo desenvolver um sistema de localização de pessoas em espaços fechados, e com granularidade fina. O protótipo criado no Laboratório de Rádio-Frequência do IT-Aveiro é constituído por módulos *SOC ZigBee CC2431* da Texas Instruments [27] e permite obter a localização de dispositivos móveis através da medição de RSSI.

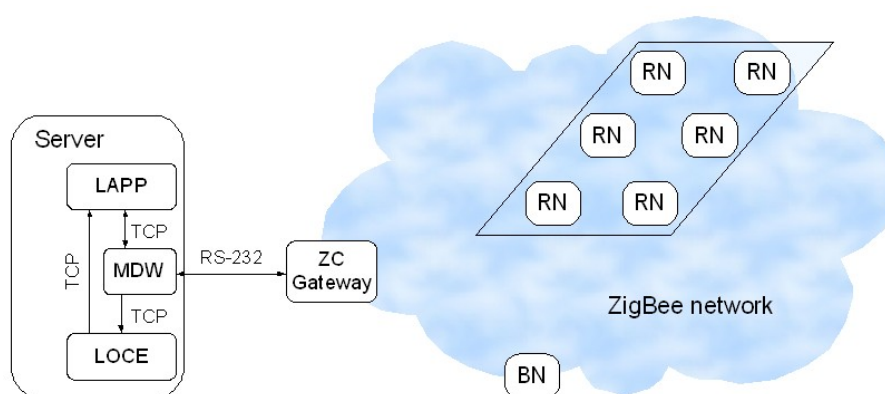


Figura 2.14 [1]: Arquitectura do sistema de localização do projecto LOPES.

A solução, ilustrada na figura 2.14, é composta por um sistema de informação (*Server*), pelos *Reference Nodes* (RN) – sensores *ZigBee* colocados no tecto do espaço de implementação, pelos *Blind Nodes* (BN) – módulos *ZigBee* que acompanham as pessoas, e pelo *ZigBee Coordinator* (ZC) – módulo *ZigBee* que organiza a rede, gere as mensagens trocadas na mesma, e assume funções de *gateway* entre a rede *ZigBee* e o *Server* e é por isso identificado na aplicação LOPES como *LocDongle*.

Modo de Operação

A *Localization Application* (LAPP) – camada de aplicação do protocolo carregado no *Server* (figura 2.14) – entrega ao *middleware* (MDW) uma lista de BNs a serem localizados. O MDW usa esta lista para criar o mapa de tempos dos pedidos a fazer à rede *ZigBee*. Os pedidos de localização a cada BN são efectuados pelo MDW, através do ZC, que transmite de forma transparente as mensagens RS-232 para a rede *ZigBee*, e vice-versa.

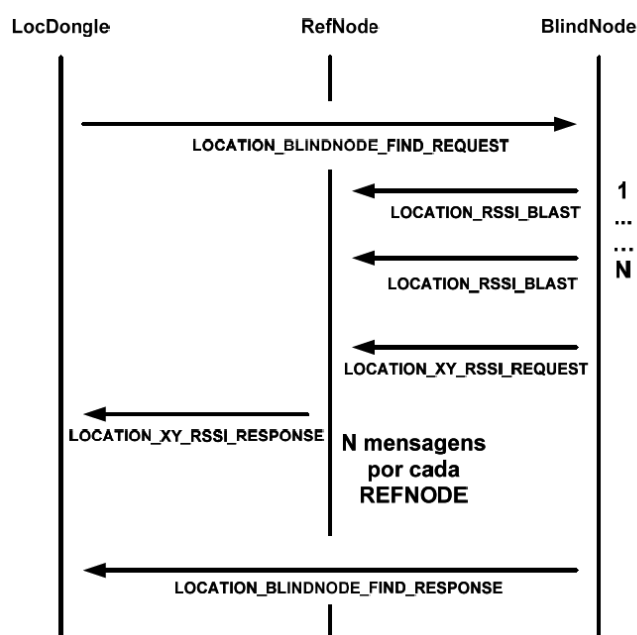


Figura 2.15 [28]: Mensagens trocadas na rede *ZigBee* durante o processo de localização.

Quando o *LocDongle* transmite à rede *ZigBee* um pedido de localização – mensagem `LOCATION_BLINDNODE_FIND_REQUEST`, a primeira da figura 2.15 – cada BN responde com o envio periódico à rede (encaminhamento *broadcast*) de uma mensagem curta – `LOCATION_RSSI_BLAST` – que contém apenas o ID do BN. Os RNs captam estas mensagens, medem o RSSI e armazenam estes valores, organizados pelos IDs dos BNs. Recebido o número de tramas pré-definido, bem como o comando de envio – `LOCATION_XY_RSSI_RESPONSE`, a informação é concatenada na mensagem `LOCATION_XY_RSSI_RESPONSE` (figura 2.15), e enviada por *unicast* para o *LocDongle* que a reencaminha para o MDW. Esta mensagem constitui um vector de valores RSSI – a “assinatura RSSI” do respectivo BN. A localização é alcançada a partir das “assinaturas RSSI” e das posições pré-determinadas dos RNs, através da execução de uma rede neuronal artificial, despoletada com a mensagem `LOCATION_BLINDNODE_FIND_RESPONSE`.

O *Location Engine* (LOCE) recebe do MDW a “assinatura RSSI”, executa a função de avaliação dessa assinatura através da rede neuronal, devolvendo as coordenadas do BN à aplicação, LAPP. O MDW opera então como o elemento central do sistema de localização, coordenando todo o funcionamento deste.

O projecto LOPES avaliou alguns algoritmos de localização baseados em redes *Bayesian* e em redes neuronais artificiais. Nesse processo foi seleccionada (por parte do IT-Aveiro) como a

melhor opção para o sistema de localização LOPES, a *Fast Artificial Neural Network Library* (FANN) [29], uma livreria de uso livre baseada em redes neuronais artificiais.

As *Artificial Neural Networks* (ANN) são algoritmos que requerem treino antes do funcionamento do sistema. Na denominada fase *offline*, o sistema recebe assinaturas de RSSI de locais previamente determinados, semelhante ao método de *fingerprinting*, mas neste caso a base de dados criada é usada para treinar uma **rede neuronal artificial** – algoritmo de localização sensível às condições ambiente presentes durante o treino.

Características Técnicas

O protótipo foi testado num laboratório do IT, Aveiro – Instituto de Telecomunicações de Aveiro. No tecto da sala foram colocados 8 RNs, dispostos em grelha de 2 por 4, com uma distância de 2 m entre eles. O teste foi efectuado com um único BN obtendo-se uma exactidão da ordem dos 2 m, como se apresenta na tabela 12.

Tabela 12: Características do LOPES.

| Frequência de Operação | <i>ZigBee</i> : 2.4 GHz ISM |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Exactidão (repetibilidade) | 2 m (90%) |
| Interfaces do módulo | 1 botão, 2 LEDs |
| Tempo médio de vida (das pilhas) | 40 horas |
| Propriedades físicas do módulo | 30 x 50 x (~10) mm |
| <i>Miscelaneus</i> | <i>Transceiver</i> : Chipcon CC2430 |

2.4. Conclusão

Dos sistemas estudados observa-se que aqueles que apresentam granularidade fina são baseados em TDOA, AOA. As tecnologias US e UWB permitem a aplicação destes métodos, embora estejam dependentes do ambiente: LOS ou NLOS. A forma mais eficaz de minimizar interferências em ambientes NLOS é alargando a banda de frequências envolvidas. Desta forma, os sistemas que melhor se adaptam a ambientes com ruído e obstáculos, e que ainda assim asseguram grande exactidão (inferior a 50 cm) e repetibilidade, são os sistemas baseados na tecnologia UWB. Os sistemas baseados no standard IEEE 802.15.4 terão uma exactidão nunca inferior a um metro.

Capítulo 3

IEEE 802.15.4 / ZigBee

A implementação fácil de soluções de controlo robustas é hoje uma necessidade evidente em instalações industriais e em redes pequenas, como é o caso da domótica. A autonomia dos dispositivos de comunicação tem vindo a revelar-se um dos factores de maior importância. Ao nível das comunicações, a monitorização de uma rede de sensores ou o controlo de um determinado processo não exigem grandes volumes de dados ou taxas de transmissão. É deste compromisso que surge o *ZigBee*, uma tecnologia de comunicações sem fios criada para a transmissão de mensagens curtas, a curto alcance e com baixo consumo de energia. É uma tecnologia de instalação simples, baixo custo e que garante elevada segurança e fiabilidade.

O *ZigBee* [30] – “*Wireless Control that Simply Works*” – foi desenvolvido pela *ZigBee Alliance* [31] sobre a especificação IEEE 802.15.4 [32], standard que define as camadas PHY e MAC, formando a pilha protocolar ilustrada na figura 3.1. A *ZigBee Alliance* desenvolve as camadas de rede, segurança e aplicação, com a missão de garantir a interoperabilidade no funcionamento das redes, compatibilidade entre produtos, conformidade entre especificações técnicas, bem como serviços de segurança na transmissão de dados. A *ZigBee Alliance* promove ainda a evolução da tecnologia e a sua aplicabilidade no mercado global das comunicações sem fios.

O standard IEEE 802.15.4, especificação para as *low-rate wireless personal networks* (LR-WPAN), define 27 canais de operação divididos em duas camadas PHY possíveis. A PHY de baixa frequência possui 11 canais, um a operar a 20 kbps e na frequência de 868 MHz (para uso na União Europeia) e 10 a operar a 40 kbps na banda de 915 MHz (para uso na América do Norte e Austrália). A PHY de alta frequência define 16 canais a operar a 250 kbps na banda livre ISM 2,4

GHz. De um modo geral, a PHY tem as funções ligar e desligar o transceptor, definir e alterar o seu estado colocando-o em transmissão, recepção ou em modo *sleep*, definir o canal de operação após o pedido da MAC e realizar a transmissão e recepção de dados. Outras funções são descritas com maior detalhe na secção 3.4.

O standard define ainda dois tipos de endereços, o endereço de rede (de 16 bits) e o endereço MAC (de 64 bits). Ambos os endereços podem ser usados na transmissão de mensagens. O primeiro tem a vantagem de ser curto, originando um pacote de dimensão reduzida. Contudo, pode alterar-se após a reconfiguração da rede. O segundo é mais longo mas não pode ser alterado, sendo o identificador do dispositivo. A especificação classifica os dispositivos que podem participar numa rede LR-WPAN como *Full Function Devices* (FFD) e *Reduced Function Devices* (RFD). Os primeiros têm a capacidade de criar e controlar uma rede, registar todas as suas definições e efectuar reencaminhamento de mensagens. Os RFDs apenas comunicam com um FFDs.

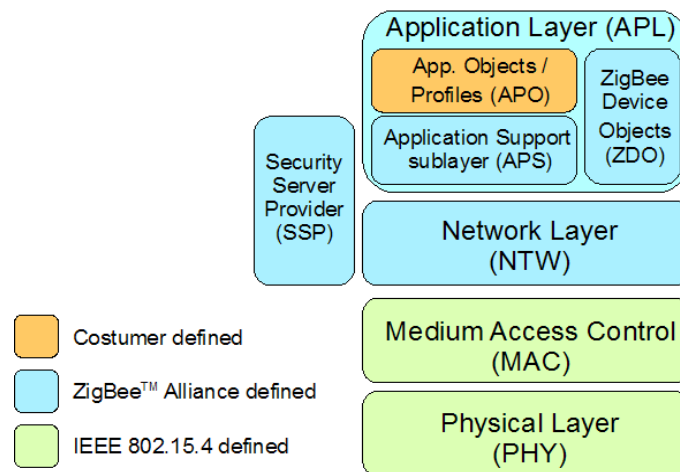


Fig. 3.1: ZigBee Stack.

As comunicações ZigBee/IEEE 802.15.4 podem ser efectuadas para um endereço individual – modo *unicast* – ou usando um endereço global – modo *broadcast*. No primeiro caso, todos os módulos ao alcance do transmissor da trama detectam a mensagem mas não a interpretam, excepto o destinatário. Os FFDs que captam uma mensagem destinada a outro módulo efectuem o reencaminhamento da mesma, como se explica na próxima sub-secção. No segundo modo, todos os módulos que captam a mensagem procedem à interpretação da mesma. Também neste modo, os FFDs efectuem o reencaminhamento da mensagem.

3.1. Topologias de rede

As redes ZigBee podem assumir três topologias diferentes: *star*, *mesh* e *cluster-tree*. Por defeito, as redes são auto-configuráveis: o *coordinator* analisa, sequencialmente, a actividade nos canais para os quais foi configurado, seleccionando o primeiro cuja energia detectada esteja abaixo de um determinado limiar [30]. No caso da topologia *mesh* (ou *peer-to-peer*), as redes ZigBee são também auto-regenerativas (criando novos caminhos entre dois nós quando um ou vários intermediários perdem conectividade), permitindo assim que a rede se altere de forma dinâmica e automática no sentido de otimizar as comunicações. Em todas as topologias, o PAN Coordinator

(PANC) é responsável por inicializar e gerir a rede.

3.1.1. Topologia *Star*

Na topologia *Star*, a rede é estabelecida quando um primeiro FFD se activa, configurando a rede. Este nó assume-se como *coordinator*, definindo o PAN ID e o canal de operação da rede. Com a rede formada, é este nó que dá permissão a outros para se juntarem à PAN. Esta topologia permite a coexistência de redes *Star* dentro do mesmo alcance, uma vez que cada rede tem o seu PAN ID e opera de forma independente. Se as redes operarem em canais diferentes não haverá interferência.

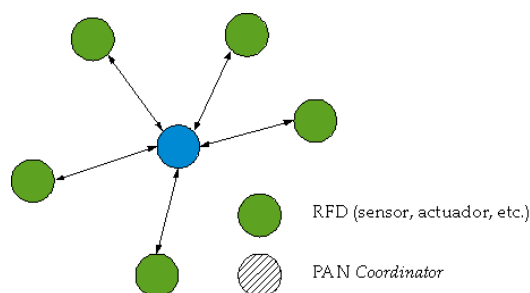


Fig. 3.2: Rede *Star*.

As redes *Star* são compostas por um PANC e vários RFDs. O PANC é o nó central da rede, responsável por manter os nós associados e controlar todas as transmissões na PAN. Os RFDs apenas comunicam com o nó central, como se ilustra na figura 3.2. Soluções de domótica ou controlo de periféricos de um PC são exemplos de aplicação das redes *Star*.

3.1.2. Topologia *Mesh*

A topologia *mesh* possibilita o reencaminhamento de mensagens, permitindo aos nós da PAN comunicarem entre si, seguindo um de vários percursos possíveis. Esta filosofia permite que a rede seja maior, mesmo que alguns nós saiam fora do alcance do PANC. As eventuais perdas de conectividade são então superadas criando caminhos alternativos para transmitir a mensagem.

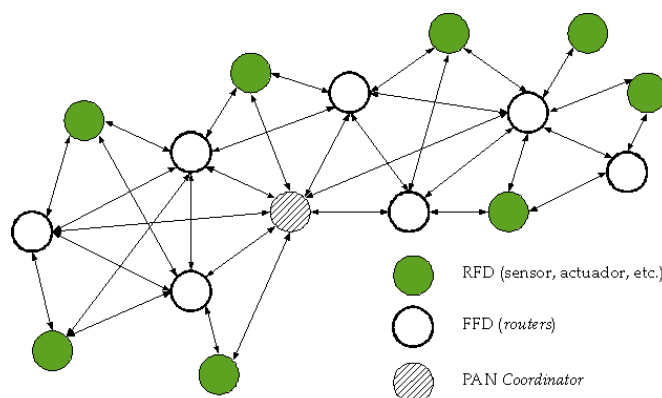


Fig. 3.3: Rede *mesh*.

Em redes *mesh* (Fig. 3.3), todos os dispositivos podem comunicar com todos os FFDs. A rede pode ser estendida através de *routers*, os quais efectuam reencaminhamento de mensagens. Em cada instante, um RFD comunica apenas com o nó FFD que o associou à rede (*RFD parent*

node). Quando um RFD perde a conectividade ao seu *parent node*, associa-se à rede a partir de outro nó FFD, assegurando a auto-regeneração. Da mesma forma, os FFDs podem seleccionar percursos alternativos para a transmissão de mensagens, quando um *router* intermediário se desliga da rede.

3.1.3. Topologia Cluster-tree

As redes *cluster-tree* (Fig. 3.4) distinguem-se pela hierarquia na formação da rede. Os *routers* podem reencaminhar mensagens, mas dentro dos limites impostos pela formação em árvore. Habitualmente, esta topologia está associada ao uso de *beacons* – mensagens pré-formatadas com as funções de confirmar a presença dos nós na PAN, realizar a sincronização dos nós da rede e delimitar as janelas temporais onde estes podem transmitir. Esta formação aplica-se em redes com formação de *clusters* – conjunto de dispositivos pertencentes à mesma classe (com atributos semelhantes) geridos por um *router* associado à rede.

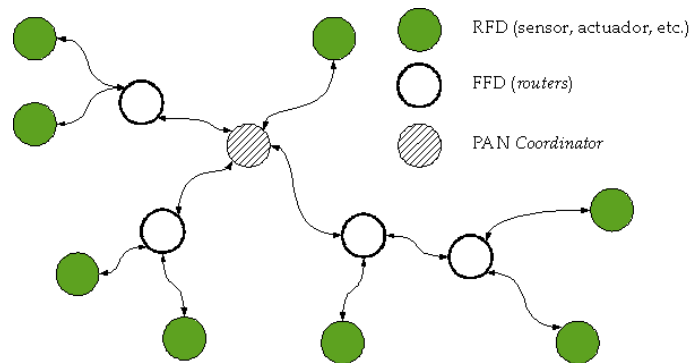


Fig. 3.4: Rede Cluster-tree.

3.2. Controlo de acesso ao meio

A especificação 802.15.4 define dois tipos de configuração do acesso ao meio: *beacon-enable* (BE) PAN e *nonbeacon-enable* (NBE) PAN. No modo BE, os dispositivos comunicam utilizando *superframes* (Fig. 3.5). Estas estruturas são delimitadas por *beacons* e constituídas por 2 *slots* temporais: o primeiro denominado de *contention access period* (CAP) e o segundo, opcional, denominado por *contention-free period* (CFP).

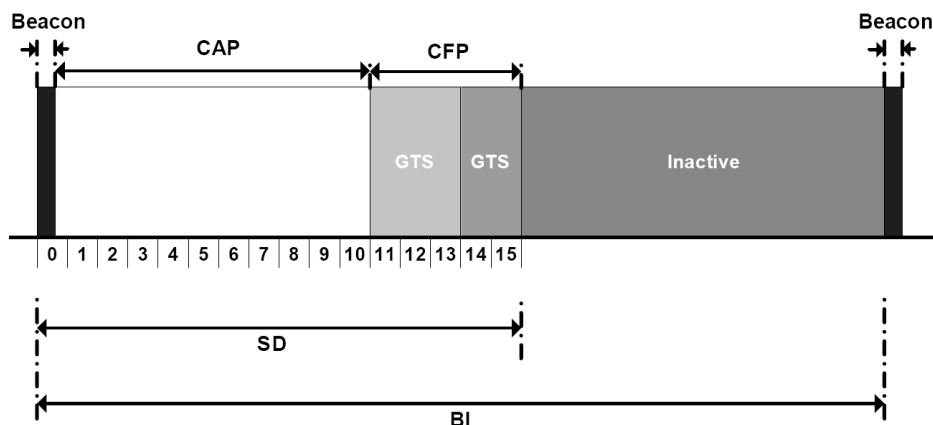


Fig. 3.5 [33]: Estrutura de uma superframe.

O CAP e o CFP podem, em conjunto, ter até 15 *slots*, que reunidos com o *slot* 0 (*beacon* inicial) completam a *superframe duration* (SD). Em determinados casos pode ainda existir um período inactivo, pós SD. O tempo entre dois *beacons* consecutivos, correspondente ao SD mais o período inactivo, designa-se por *beacon interval* (BI). Todas as transições iniciadas durante um BI devem ser terminadas antes do próximo *beacon*. Neste modo, o *coordinator* define o formato das *superframes*, ou seja o tamanho dos conjuntos CAP e CFP, procedendo também ao envio periódico dos *beacons*. O tamanho de cada slot é definido em número de períodos pré-definidos designados por *backoff period* (BoP). Os dispositivos que pretendam comunicar durante o CAP competem entre si usando o mecanismo de acesso *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), explicado na secção 3.2.3. O CFS é um espaço reservado a determinadas aplicações, normalmente às de baixa latência, constituído por *guaranteed time slots* (GTS), e portanto dedicado às aplicações tempo exclusivo. Todas as transições iniciadas durante o CAP devem ser terminadas antes do início do CFP. No modo NBE, o *coordinator* não emite *beacons* e os dispositivos acedem ao meio apenas por CSMA-CA, sem o uso de *superframes*.

3.2.1. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

O CSMA-CA, como foi referido, aplica-se em ambas as configurações da camada MAC. No modo NBE, cada dispositivo que pretenda transmitir para a rede terá de aguardar um período de tempo aleatório antes de o efectuar. Ao fim desse tempo o dispositivo procede à avaliação do canal: se este estiver ocupado volta a esperar outro tempo aleatório, se estiver livre procede à transmissão.

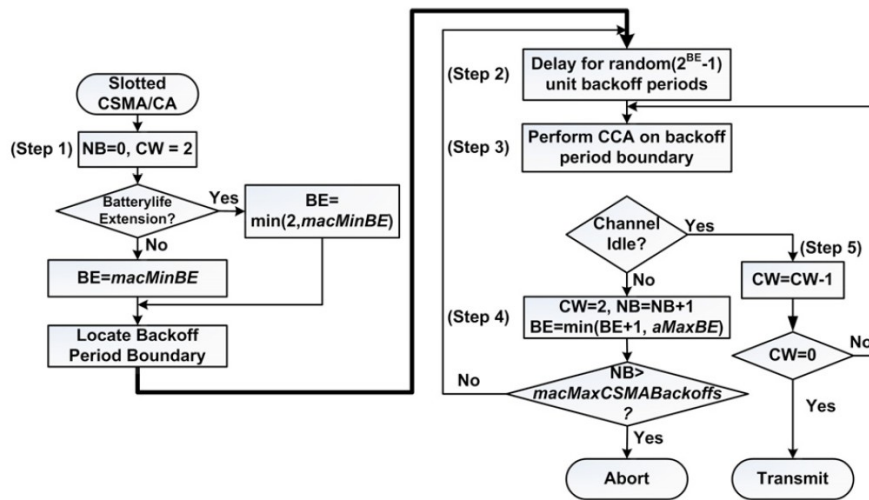


Fig. 3.6 [34]: Estrutura do mecanismo CSMA/CA para o BE.

No modo BE, um dispositivo que pretenda transmitir durante o CAP terá de seguir o procedimento ilustrado na figura 3.6. Antes de transmitir um pacote (trama), o dispositivo aguarda um número aleatório de BoPs entre 0 e $[2^{BE} - 1]^2$. Quando este tempo expira, o dispositivo realiza um *Clear Channel Assesment* (CCA), que consiste em verificar se o canal está ou não livre (ver

2. O BE – *backoff exponent*: número que introduz a aleatoriedade no sistema. Este número varia habitualmente entre 2 e 3.

secção 3.3.1). Se o canal se encontrar livre, o dispositivo decremente a *contention window* (CW)³ e volta a esperar um número aleatório de BoPs do *slot* CAP (Fig. 3.6, *step* 2) antes de efectuar o próximo CCA (Fig. 3.6, *step* 3). Se o canal se encontrar ocupado, o CW toma o valor por defeito e o *number of backoffs* (NB)⁴ é incrementado. Se o NB for inferior ao valor máximo, o dispositivo torna a esperar um tempo aleatório dentro do intervalo referido, mas agora com BE incrementado. Se este valor ultrapassar o máximo definido – *macMaxCSMAbackoffs* – o processo termina com o *Channel Access Failure status*, ou seja, a transmissão é cancelada nesse BI e deferida para o próximo. Se o CW atingir o valor zero, o dispositivo verifica se ainda existem BoPs suficientes no CAP para o envio da trama completa mais o *acknowledgement* (ACK). Caso se verificar esta condição, o dispositivo procede à transmissão no início do próximo BoP, de contrário espera pelo próximo *beacon*. O CSMA-CA não é aplicado na transmissão de tramas específicas, como os *beacons* (exclusivos ao *Coordinator*) ou *acknowledgements*, nem durante o *slot* CFP.

3.3. IEEE 802.15.4 PHY – ISM 2,4 GHz

3.3.1. Clear Channel Assessment

O *Clear Channel Assessment* (CCA) é um processo de avaliação do canal de transmissão. Este processo é despoletado por um nó de uma rede quando o mesmo pretende transmitir uma mensagem. Este processo consiste em avaliar a energia do canal – *Energy Detection* (ED) – e comparar esta com um valor de energia *threshold*, previamente definido. Se a energia do canal for inferior ao valor *threshold*, o CCA indica que o canal se encontra livre. Caso contrário, o CCA indica que o canal está ocupado.

3.3.2. Offset-Quadrature Phase Shift Keying

A camada PHY ISM 2,4 GHz do standard IEEE 802.15.4 usa uma técnica de modulação de sinal onde cada conjunto de 4 *bits* dá origem a uma sequência de 32 *bits* – a *PN sequence*. Esta técnica, designada por *16-ary quasi-orthogonal modulation*, transforma cada *byte* de uma trama em 2 símbolos (4 *bits*/símbolo). Cada um dos 16 símbolos possíveis corresponde a uma das 16 *nearly orthogonal pseudo-random noise* (PN) *sequences*, previamente tabeladas. No processo de envio de uma trama, cada um dos 32 *bits* de uma sequência PN é inserido sucessivamente numa *chip sequence*, que é transmitida usando a técnica de *offset-quadrature phase shift keying* (O-QPSK). Esta técnica consiste em colocar os *chips* em duas portadoras de forma sequencial, como se ilustra na figura 3.7.

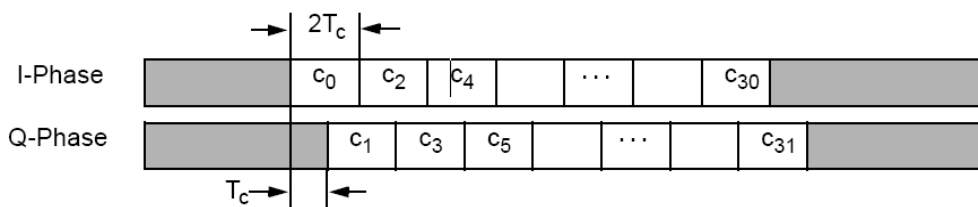


Fig. 3.7 [32]: Processamento de sequências PN por modulação O-QPSK.

3. O CW define o número de vezes que o dispositivo tem de “sentir” a portadora livre antes de proceder à transmissão.

4. O NB representa o número de vezes que o CSMA tem de ser realizado antes do módulo aceder ao canal.

O standard define, para os 2,4 GHz, uma *bitrate* de 250 kbps, o que em símbolos corresponde a 62,5 kbps. Para responder a esta especificação, a O-QPSK usa uma *chip rate* de 32 vezes a *symbol rate*, isto é, 2 Mcps. O período associado a um *chip*, T_c , é então de 0,5 μ s.

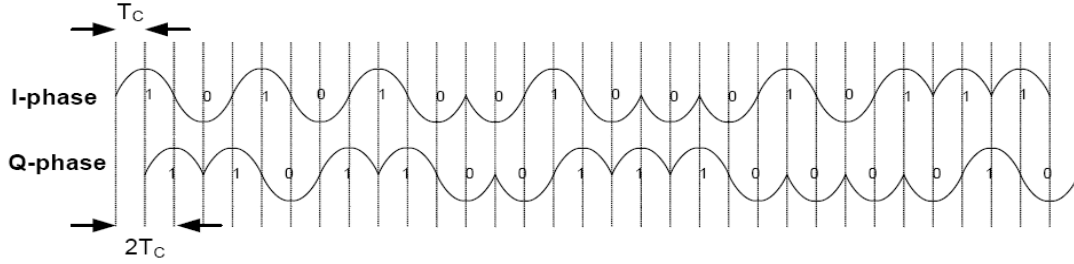


Fig. 3.8 [32]: Sub-portadoras usadas pelo método DSSS.

Colocando os *chip values* (0 ou 1) em duas sub-portadoras, os de índice par modulados para a *in-Phase* e os de índice ímpar para a *quadrature-Phase*, e aplicando um período de *offset* (T_c) entre ambos, são gerados 2 sinais sinusoidais, separados por um atraso de 90°, como se ilustra na figura 3.8, com quatro fases distintas (0°, 90°, 180° e 270°). Este método permite evoluir para um maior número de fases com menor diferença angular, mas tal deixa de ser facilmente interpretado pelo receptor da mensagem [32].

Ao converter um conjunto de 4 *bits* numa sequência PN de 32 *bits*, a técnica O-QPSK constitui a introdução de redundância no processo de construção de uma trama. Se alguns *chip values* forem afectados por ruído durante a transmissão, o receptor mantém a capacidade de obter o símbolo correcto, descodificando os 4 *bits* originais. A transmissão das sub-portadoras, com a diferença de fase referida ($\pi/2$) é a base do mecanismo *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) [35]. Com este método, a energia da portadora é espalhada por várias frequências e difundida com menor potência, introduzindo diversidade no processo de transmissão.

A razão entre a potência do sinal original e a potência do sinal espalhado no espectro é a igual à razão entre a *chip rate* (c_R) e a *bit rate* (b_R), e designa-se por ganho do processo (PG), habitualmente expressa em dB:

$$PG = 10 \cdot \log\left(\frac{c_R}{b_R}\right) \quad (3.1)$$

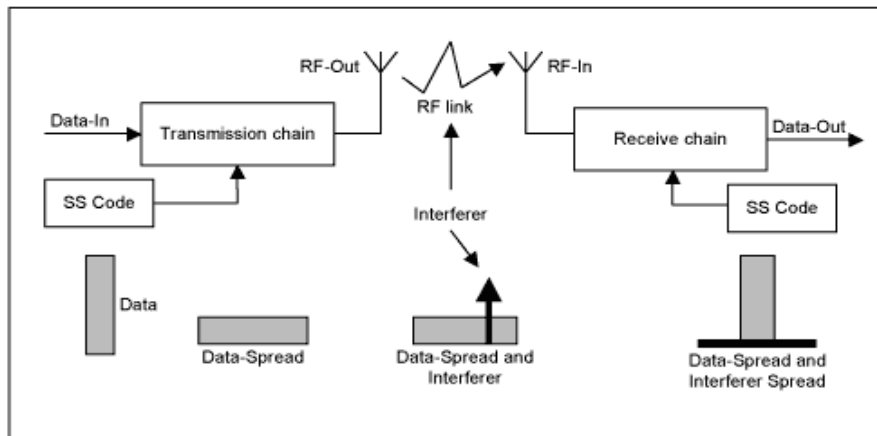


Fig. 3.9: Processamento de sinal com DSSS [35].

A operação de descodificação de sinal consiste na reunião deste na mesma banda de frequências usada antes da difusão. Neste processo (fig. 3.9), todos os sinais que se adicionarem durante a transmissão, e que não contenham a chave para reunião do sinal naquela frequência, são espalhados no espectro, diminuindo a sua energia com a razão PG, evitando assim a interferência de ruído ou as situações de *jamming* – barramento a transmissões numa dada frequência.

Quando duas sequências PN são transmitidas ao mesmo tempo, na mesma frequência, por dispositivos diferentes, o receptor reúne o sinal espalhado com uma determinada chave e mantém a outra sequência PN espalhada no espectro, ou seja com ganho de processo nulo. Este é o princípio base da modulação *Code Division Multiple Access* (CDMA). No processo de alargamento de banda e consequente recuperação da portadora (des-modulação), a interferência no sinal é diluída no espectro, melhorando as hipóteses de sucesso da reconstituição do sinal original. A DSSS possibilita ainda neutralizar efeitos de *fading/multipath* durante a reconstituição do sinal espalhado, pois o receptor rejeita qualquer sinal que chegue posteriormente, com uma chave de acesso igual a outra recentemente descodificada. Os receptores que não tiverem acesso à chave atribuída no processo de espalhamento, não conseguem descodificar os dados transmitidos, mantendo-se assim a privacidade dos mesmos.

Capítulo 4

Introdução de interferência em sistemas ZigBee

Como referido no capítulo 1, os sistemas de localização baseados em comunicações na banda 2,4 GHz ISM podem, em muitas situações, encontrar fontes de ruído com potência suficiente para adulterar os resultados dos pedidos de localização. Nos casos onde a razão entre as potências dos dois sistemas é elevada, a fonte de ruído pode mesmo impedir as comunicações. Os sistemas de localização baseados em IEEE 802.15.4, implementados numa área coberta por redes *Wi-Fi*, são exemplo do problema. A interferência na banda ISM 2,4 GHz afecta estas comunicações, provocando atrasos nas transmissões, perdas de pacotes e alteração da relação “distância entre módulos - potência recebida”.

Neste trabalho é avaliada uma rede *ZigBee* ponto-a-ponto, a comunicar em modo *unicast*, através da medição dos atrasos nas transmissões e o número de pacotes perdidos num ensaio. No sentido de otimizar o sistema, foram realizados ensaios em função da orientação das antenas, com o objectivo de determinar orientações relativas preferenciais. A relação “distância entre módulos - potência recebida” não será abordado neste trabalho, uma vez que o contexto de aplicação é o projecto LOPES cujo o algoritmo de localização é uma rede neuronal artificial, treinada no ambiente de operação, ou seja, a relação distância-potência será sensível a todas as condições ambientais.

Os atrasos nas transmissões podem causar enorme latência na operação do sistema de localização, resultando em menor eficiência quanto maior for o número de dispositivos a localizar. A perda de pacotes conduz à perda de resolução do sistema, tornando-o menos eficaz. Estes parâmetros têm então especial relevância na avaliação do sistema e serão por isso focados nos ensaios.

4.1. Coexistência na banda ISM 2,4 GHz

Na última década assistiu-se a um enorme crescimento das tecnologias sem fios. Para facilitar o desenvolvimento de aplicações baseadas em redes sem fios, vários standards foram criados e otimizados. As bandas ISM, definidas pelo ITU Radiocommunication Sector (ITU-R)⁵, por serem livres de licença, alojam uma grande heterogeneidade de tecnologias.

O caso mais estudado e mais problemático para o normal desempenho de uma rede *ZigBee* é a coexistência desta tecnologia com redes *Wi-Fi*, como será demonstrado na secção 4.2. Para prevenir a interferência entre estas redes, o standard IEEE 802.15.4 recomenda a utilização dos canais que se situam nas bandas de guarda entre canais adjacentes e não sobrepostos dos standard IEEE 802.11. São eles os canais 15 (2425 MHz), 20 (2450 MHz), 25 (2475 MHz) e 26 (2480 MHz), com se ilustra na figura 4.1.

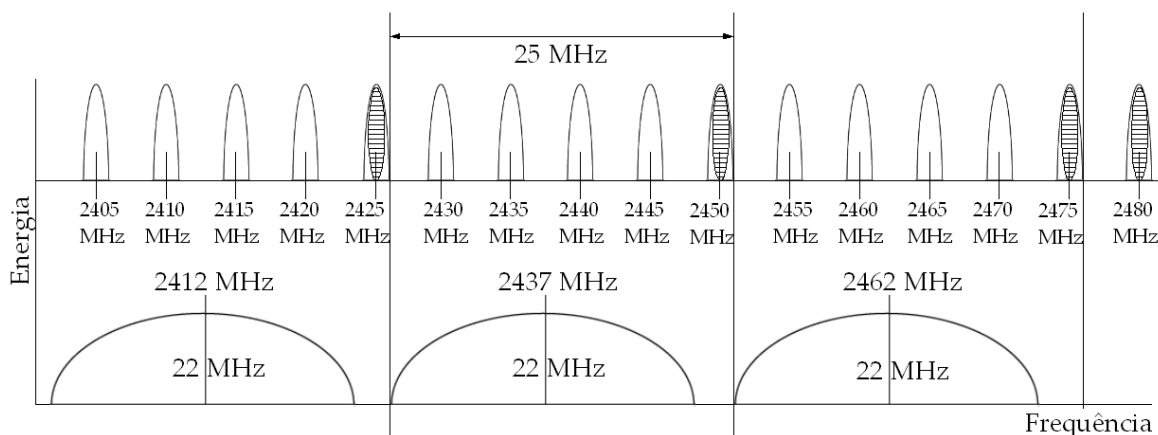


Fig. 4.1: Distribuição de canais na banda ISM 2,4 GHz. Em cima os 16 canais ZigBee, do 11 ao 26. Em baixo os canais Wi-Fi 1, 6 e 11.

As redes *Wi-Fi* são habitualmente constituídas usando os primeiros 3 canais não sobrepostos, o 1 (2412 MHz), o 6 (2437 MHz) e o 11 (2462 MHz), de forma a minimizar a interferência entre as comunicações da própria rede. A energia presente nas bandas de guarda não é nula, mas é normalmente bastante inferior à energia trocada pelas redes baseadas em IEEE 802.15.4, e portanto o uso destas bandas espectrais, por parte das LR-WPANs, minimiza a interferência entre os dois sistemas.

4.2. Trabalhos relacionados

O desempenho das LR-WPAN baseadas no standard IEEE 802.15.4 standard tem vindo a ser estudado, nomeadamente em função das configurações de acesso ao meio (propriedades MAC) e do tráfego injectado na rede, usando modelos de simulação como o NS-2 [36] ou o OPNET [34]. Em [37] foram simulados testes de coexistência de redes baseadas em IEEE 802.15.4 com *wireless local area networks* (WLANs) baseadas no standard IEEE 802.11b [38], tendo obtido resultados para a perda de pacotes – *packet error rate* (PER) – da rede LR-WPAN da ordem dos 90%, quando a operar no mesmo domínio de frequência da rede WLAN. Estes resultados já eram expectáveis face à maior potência de transmissão de uma rede *Wi-Fi* típica. Pela mesma razão, a rede *Wi-Fi* não sente a interferência causada pela LR-WPAN, consequência reforçada pela

5. ITU – *International Telecommunication Union*.

robustez da modulação OFDM (ver secção 2.2.3) característica do standard IEEE 802.11.

O desempenho de uma rede *ZigBee* em coexistência com redes *Bluetooth* ou com fornos de microondas foi avaliado em [39]. Os resultados demonstraram não haver grande influência na operação da rede *ZigBee*. Em [40] foi avaliado o desempenho de uma rede *ZigBee* em coexistência com uma rede *Bluetooth* e uma rede *Wi-Fi*, observando a relação entre a PER da rede *ZigBee* e a distância desta às outras redes *wireless*. Verificou-se que a PER atinge os 16% quando dista menos de um metro da *piconet*, diminuindo para 1% a 2 metros daquela. A análise de coexistência revelou novamente o domínio interferente da rede *Wi-Fi*.

No projecto “Finding NEMO” [41] é avaliada a exactidão de um sistema de localização baseado em IEEE 802.15.4. Os ensaios efectuados com módulos *ZigBee* CC2420 (da Texas Instruments) mostraram que o sistema tem capacidade de localização fina, conseguindo uma exactidão na ordem dos 10 cm, para distância inferiores a 1 m, e portanto capaz de suportar aplicações em cenários de segurança crítica, como os hospitais ou centros clínicos. O trabalho inclui também estudos de PER em função da distância entre o transmissor e o receptor, e na presença de um atenuador de 9 dB. Estes estudos revelaram que a PER atinge os 100% para distâncias superiores a 50 cm. O projecto identificou ainda a orientação das antenas como uma característica relevante no desempenho do sistema.

Em nenhum destes trabalhos se realizou uma avaliação à orientação das antenas, que serve de ponto de partida para a análise seguinte. Neste trabalho optou-se também por se realizar uma análise de pior caso, ou seja, avaliação do desempenho da rede *ZigBee* sob condições de interferência extrema.

4.3. Set up experimental



Fig. 4.2: Dispositivo MioBee (sem antena).

O *set-up* experimental é composto por dois dispositivos *MioBee* (a fonte de dados e o receptor), um gerador de microondas e um sistema de medição de atrasos [42]. O *MioBee* (ilustrado na Fig. 4.2) é um módulo de testes *ad-hoc*, criado na Micro I/O, controlado por uma PIC e que inclui um módulo periférico *ZigBee*. No *set-up* criado para este efeito, a fonte de dados inclui um módulo Maxstream XBee [43], onde se encontra integrada uma antena *whip*, e uma PIC18F2580 [44], enquanto o módulo receptor é composto por um módulo Maxstream XBee PRO

com uma antena RPSMA, com um microcontrolador igual ao anterior. A escolha de uma antena diferente para o nó emissor prende-se com o objectivo de tornar as comunicações mais sensíveis à orientação da fonte.

Os módulos Maxstream foram configurados *offline* através da aplicação X-CTU [45], nos modos apresentados na tabela 13. Esta aplicação permite alterar o *firmware* dos módulos e também alguns parâmetros de operação, como o canal e a potência de transmissão. Ambos os módulos foram configurados para operar no canal 20, delimitado pelas frequências 2,449 GHz e 2,451 GHz. A fonte de dados foi configurada com a versão de *firmware* 8.117 – *Coordinator, API Operation*, enquanto o receptor foi configurado com a versão 8.137 – *Router, API Operation*.

Tabela 13: Configuração dos módulos ZigBee.

| | XBee (fonte de dados) | XBee PRO (destino) |
|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Função API | Coordinator | Router |
| Canal de operação | 20 (0x14) | 20 (0x14) |
| Potência irradiada | 0 dBm | Não aplicável |
| Sensibilidade | -92 dBm | -100 dBm |
| <i>Baud Rate</i> | 19.200 bps | 19.200 bps |

A fonte de microondas usada nos ensaios foi um HP 8753D *Network Analyzer* [46] equipado com uma antena omnidireccional EZ Connect™ SMCHMANT-4 [47]. Este equipamento foi configurado para operar com 2 MHz de largura de banda, de 2,449 GHz e 2,451 GHz, o que coincide com a banda de operação da ligação *ZigBee*.

O *firmware* da fonte de dados, instalado no microcontrolador, gera tramas de formato *ZigBee API* que são enviadas, por porta série, para o módulo *XBee*. Este módulo recebe as tramas, processa as mesmas e transmite-as através do modem IEEE 802.15.4. Do lado do receptor, as tramas API captadas pelo módulo *XBee PRO* são enviadas para o microcontrolador.

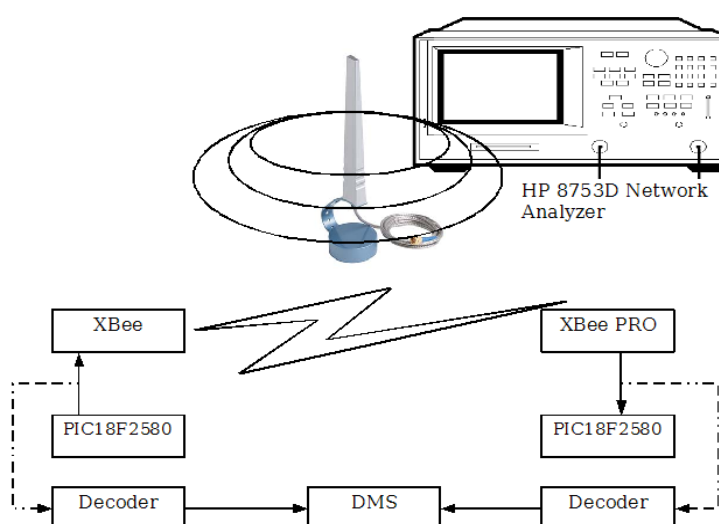


Fig. 4.3: Dispositivo experimental para avaliação de desempenho.

O desempenho da ligação *ZigBee* é avaliado pelo *Delay Measurement System* (DMS) [42]. Este dispositivo funciona com dois *sniffers* conectados à ligação série microcontrolador-XBee como se ilustra na figura 4.3. As tramas API geradas têm um *byte* de *payload*, cujo valor é incrementado a cada envio. Cada trama enviada ao módulo *Xbee* é também captada pelo *Sniffer*. Este módulo, através do microcontrolador nele integrado – o *Decoder*, obtém da trama o *byte* de *payload* e transmite-o, via EIA-232, para o DMS. Do outro lado, o outro *Sniffer* faz a mesma operação à trama enviada do módulo *Xbee PRO* para o PIC. O DMS regista os instantes de transmissão e recepção de um *byte*, medindo o atraso na comunicação. O DMS tem ainda a capacidade contar o número de tramas perdidas num período e de medir os atrasos mínimo, médio e máximo, bem como apresenta-los num histograma.

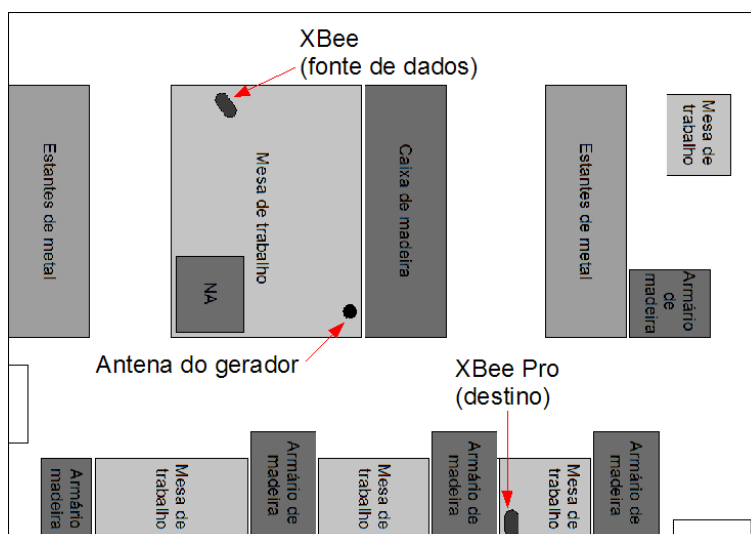


Fig. 4.4: Disposição da sala de ensaios.

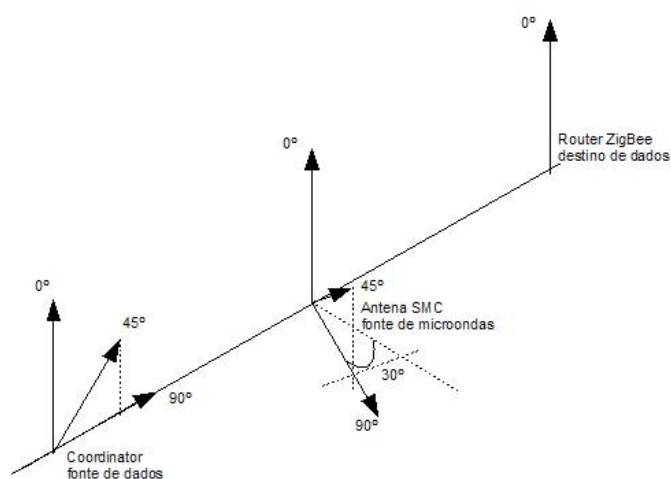


Fig. 4.5: Representação das disposições das antenas.

Os ensaios efectuados consistem no envio de 1000 tramas a uma taxa de 5 tramas/s. O DMS procede à contagem das tramas recebidas pelo destino, bem como o tempo médio das transmissões com sucesso. A disposição de todos os módulos está esquematizada na figura 4.4. Os

módulos *ZigBee* foram colocados todos no mesmo plano e em linha recta. Por limitações físicas, o plano de variação da orientação da antena fonte de microondas encontra-se a 60° da recta colinear que passa pela origem das 3 antenas, como ilustra a figura 4.5. O módulo destino de dados esteve na posição angular de 0° em todos os ensaios (como se ilustra na mesma figura). As antenas da fonte de dados e da fonte de ruído foram colocadas em três orientações cada, perfazendo 9 configurações possíveis do dispositivo experimental.

Capítulo 5

Resultados experimentais e validação teórica

Neste trabalho foram efectuados dois conjuntos de ensaios. No primeiro fez-se variar a potência do gerador e a orientação relativa da fonte de dados, com o objectivo de perceber os limites de operação do sistema de localização em coexistência com uma fonte de ruído na banda ISM, tentando ao mesmo tempo conseguir determinar uma orientação preferencial da antena fonte de dados ZigBee, relativamente à antena receptora. No segundo fez-se variar a orientação relativa da fonte de dados e a da fonte de ruído, mantendo constante a potência de ruído e a orientação da antena do destino de dados ZigBee. Este ensaio teve como objectivo compreender a intensidade da interferência electromagnética em função da orientação relativa das antenas fonte de dados e fonte de ruído. Os dois conjuntos completam 21 configurações diferentes do *set-up* experimental, para cada uma das quais foram realizados 10 ensaios.

5.1. Ensaios de Potência

Neste conjunto de ensaios foi medido o atraso médio das comunicações ZigBee e o número de pacotes recebidos pelo destino, para valores de potência do gerador de microondas entre -30 dBm e +10 dBm, em intervalos de 10 dBm. Para cada um destes 5 níveis de potência, e para cada uma das 3 orientações possíveis da antena da fonte de dados (0°, 45° e 90°, segundo o ângulo polar) foram realizados 10 ensaios com o DMS. Em cada ensaio foi apurado o atraso médio nos 1000 envios, bem como o número de pacotes recebidos pela rede. Para cada conjunto de 10 ensaios sob a mesma configuração, foi obtida a média dos atrasos médios e o número médio de pacotes perdidos. Os resultados estão ilustrados nas figuras 5.1 e 5.2.

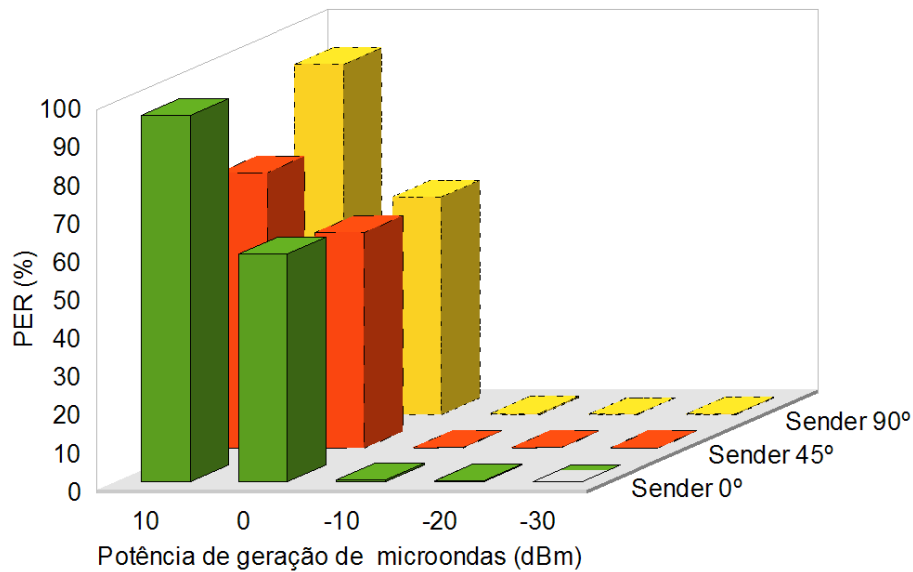


Fig. 5.1: Número de pacotes perdidos por potência de ruído.

A figura 5.1 permite verificar que o número de pacotes perdidos aumenta para cargas maiores, como seria de esperar. Nesta figura é possível observar uma taxa de sucesso de 27,8%, para a orientação de 45° do módulo fonte de dados, num cenário onde a fonte de ruído ocupa a totalidade do canal de operação da rede *ZigBee*, com uma potência 10 vezes superior à de transmissão de pacotes *ZigBee*. Mesmo para a geração de microondas a 0 dBm, não será de esperar que um sistema de localização baseado em redes *ZigBee*, seja capaz de obter valores de RSSI credíveis, e em número suficiente, para que a assinatura criada possa ser identificada com correspondente a uma *fingerprint*.

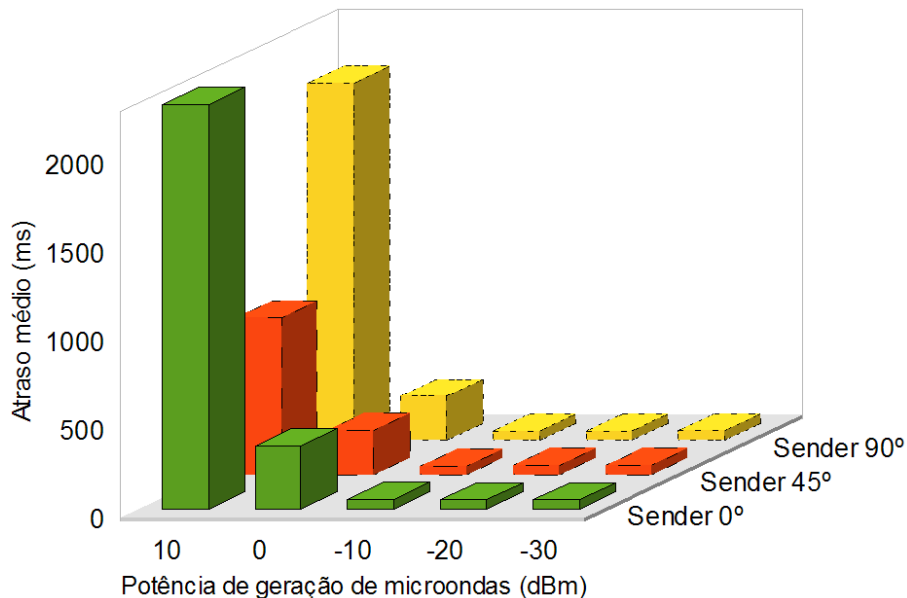


Fig. 5.2: Atraso entre comunicações *ZigBee* por potência de ruído.

A figura 5.2 corrobora as considerações anteriores. Os atrasos médios das transmissões

ZigBee aumentam de forma notória quando em coexistência com microondas de potência coincidente ao sistema *Zigbee*, face às potências de ruído inferiores a 0 dBm. Para a potência máxima de irradiação de microondas ensaiada, o atraso médio nas comunicações pode atingir os 2 s, impedindo o normal funcionamento de um sistema de localização a operar neste cenário. O valor obtido para a orientação da fonte de dados a 0° (Sender 0°) – 2,3s – implica que um *Blind Node* (Projecto LOPES, secção 2.3.2) leve cerca de 23s para ser localizado, pondo em causa a eficácia do sistema. Também neste parâmetro se identifica uma grande diferença no desempenho da rede para orientação relativa a 45°, face as restantes orientações.

5.2. Ensaios de Orientação

Para os ensaios de orientação relativa entre fonte de dados *ZigBee* e fonte de microondas, foi fixada a potência do gerador a 0 dBm. Na escolha do nível de potência procurou-se o equilíbrio entre o sucesso das comunicações e a influência da presença de ruído. Este conjunto de ensaios compreende 9 configurações de *set-up*, correspondentes às combinações das orientações de 0°, 45° e 90° segundo o ângulo polar, das antenas da fonte de dados e da fonte de microondas. As figuras 5.3 e 5.4 ilustram os resultados obtidos do número de pacotes perdidos e dos atrasos médios de pacotes com sucesso, em função da orientação da fonte de dados.

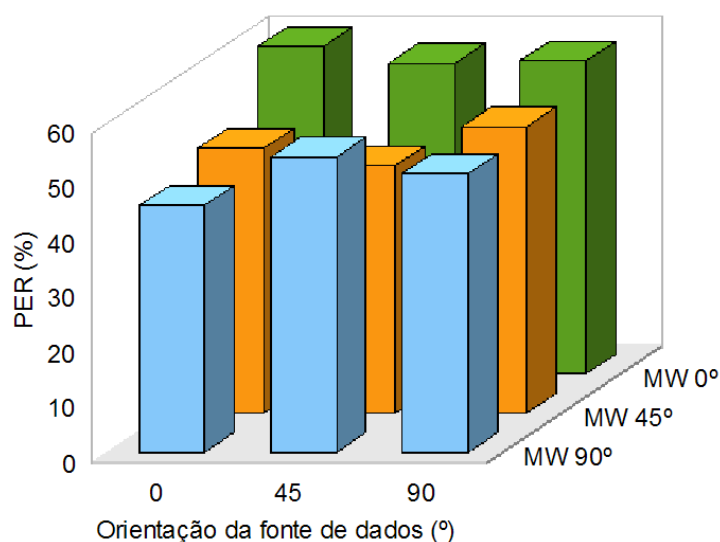


Fig. 5.3: Número de pacotes perdidos por orientação da fonte de dados.

Na figura 5.3 é possível observar que o desempenho da rede *ZigBee* é mais fraco segundo a orientação vertical (0°) da antenna de microondas. Ao variar a orientação desta antenna para 45° é visível o melhor desempenho do sistema *ZigBee*. A figura 5.4 é ainda mais ilustrativa do melhor desempenho do sistema para orientação da injeção de ruído a 45°. Nesta figura fica bem claro que a orientação da fonte de ruído é mais determinante no desempenho do sistema que a orientação da fonte de dados, consideração que já era esperada face à diferença significativa entre as duas antenas⁶.

6. A antenna *SMCHMANT-4* é muito maior que a antenna *whip*, é um dipolo de $\lambda/2$ e terá certamente um diagrama de radiação muito próximo do da antenna *RP-TNC*, ou seja, mais perfeito em ambos os cortes, vertical e azimutal.

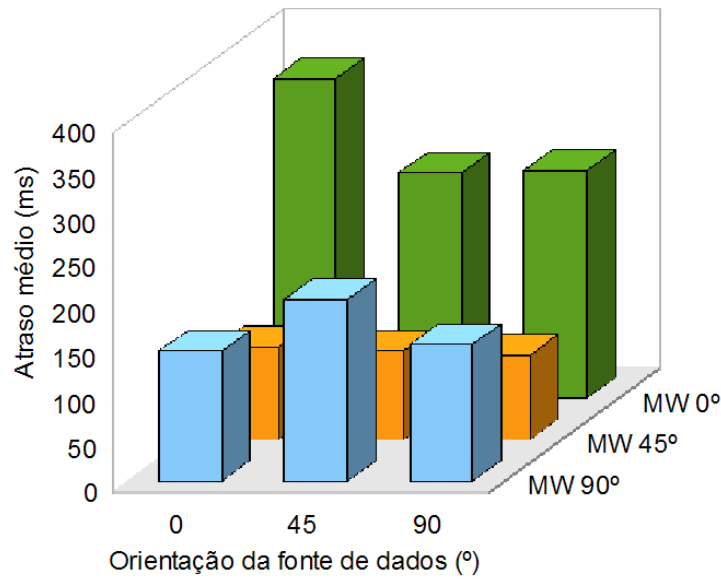


Fig. 5.4: Atraso entre comunicações ZigBee por orientação da fonte de dados.

5.3. Discussão dos resultados

A geração de microondas com uma potência de 10 dBm (10 mW) constituiu o ambiente mais hostil dos ensaios efectuados. Com a total ocupação de uma estreita banda de frequências entre os 2,449 GHz e os 2,451 GHz, coincidente com o canal ZigBee em uso, a rede que opera a uma potência de 0 dBm (1 mW) consegue uma taxa média de sucesso de 27,8%, ou seja, um valor de *packet error rate* (PER) de 72,2%.

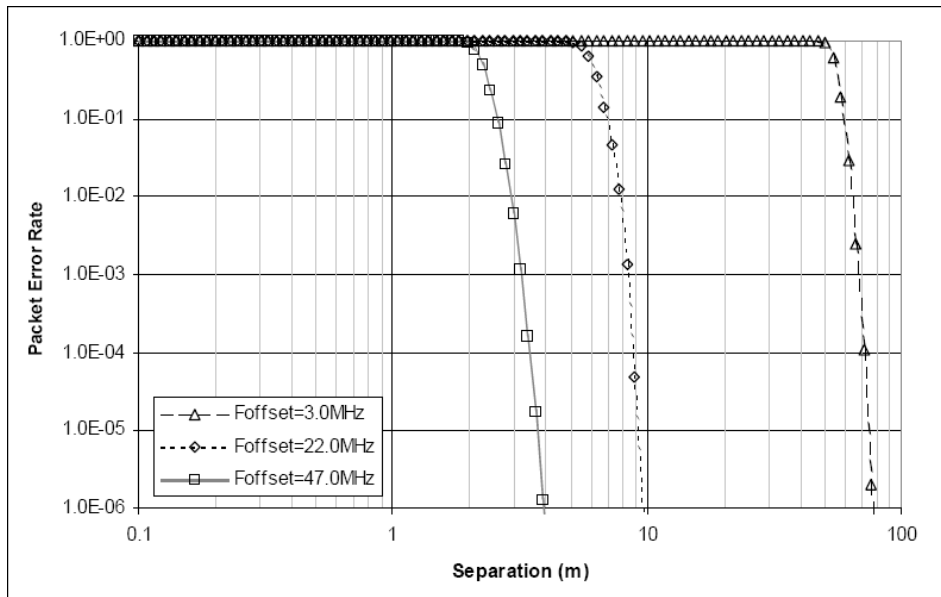


Fig. 5.5: PER vs distância entre redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b (fonte [32]).

A especificação IEEE 802.15.4 inclui estudos de desempenho deste *standard* em função do *signal-to-noise ratio* (SNR) e em coexistência com a tecnologia IEEE 802.11b. O primeiro estudo

foca os valores de *bit error rate* (BER), parâmetro que indica o número de bits recebidos incorrectamente. A BER não tem uma relação constante com a PER, uma vez que uma trama pode ser decodificada com alguns *bits* recebidos incorrectamente. No estudo de simulação do desempenho de comunicações *ZigBee* em coexistência com *Wi-Fi*, a especificação apresenta uma PER muito próxima dos 100% para distâncias inferiores a 50 m, relativamente à rede *Wi-Fi*, e a operar com um desvio de frequência de 3 MHz. O mesmo se verifica para distâncias inferiores a 2 m, a operar com um desvio em frequência de 47 MHz (Fig. 5.5). O caso em estudo neste trabalho pode ser comparado com a simulação referida, assumindo o pior caso, ou seja, com uma distância inferior a 2 m e a operar em banda de frequência coincidente. Na situação apresentada no início desta secção, o SNR apresenta um valor igual a:

$$SNR = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{ZigBee}}{P_{ruído}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1\text{mW}}{10\text{mW}}\right) = -10\text{dB} \quad (5.1)$$

Com este valor de SNR, e dadas as referidas condições de ensaio, é de esperar uma PER próxima dos 100%. Os ensaios realizados apresentam uma PER de 72,2%, valor bastante inferior aos obtidos na simulação com *Wi-Fi*. Este facto pode ser facilmente explicado tendo em conta que a potência de funcionamento padrão do *Wi-Fi*, 17 dBm, é bastante superior à potência de irradiação de microondas. O mecanismo DSSS usado pela tecnologia baseada em IEEE 802.11 pode constituir outra característica de degradação das comunicações *ZigBee*, designadamente ao nível da decodificação dos bits, tornando o *Wi-Fi* mais destrutivo para os sinais *ZigBee*, face à fonte de microondas.

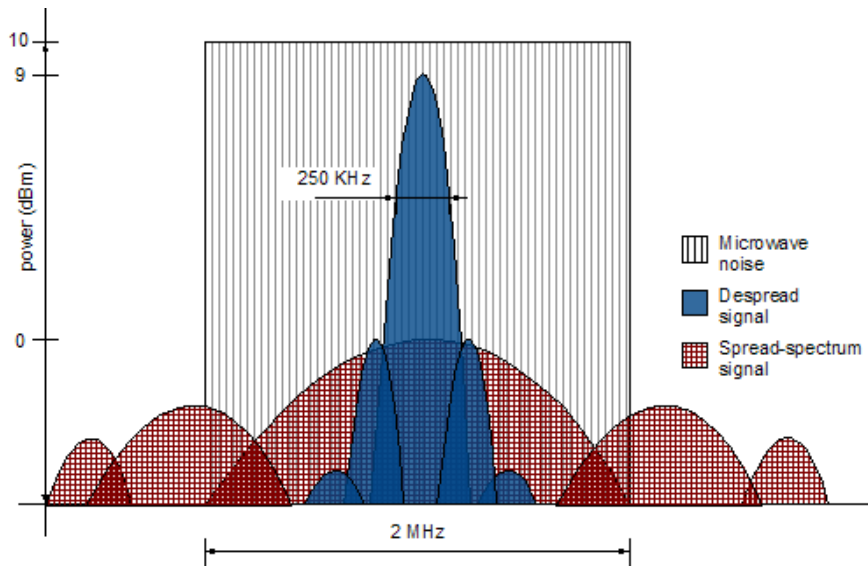


Fig. 5.6: Reunião do espectro do sinal ZigBee.

Como referido anteriormente, no âmbito deste trabalho foram realizadas comunicações *ZigBee* a 0 dBm. Por O-QPSK e DSSS, a banda de 250 kbps é alargada com um ganho de processo de 9 dB (equação 5.1), resultando numa banda larga de 2 MHz, usada aos 0 dBm definidos no módulo transmissor. O receptor recebe dados a 0 dBm dentro de uma banda de 2 MHz, que serão reunidos numa banda de menor largura (250 kbps) a 9 dBm. Se a radiação de microondas consistisse num pulso estreito, o mesmo seria disperso na banda de largura igual a 2 MHz aquando

da recepção no módulo destino de dados. Mas neste caso a irradiação de microondas é gerada em toda a banda de 2 MHz, o que implica um processo de descodificação com ganho de processo nulo, e portanto a presença ruído na banda de 2 MHz, com a potência de 10 dBm (Fig. 5.6). Neste contexto não é de esperar que o receptor tenha capacidade para receber com sucesso pacotes vindos do transmissor. Contudo, devido a flutuações estatísticas na propagação de rádio-frequência e, eventualmente, a variações de potência do gerador de microondas, observa-se que as comunicações com sucesso acontecem, reforçando a opção desta tecnologia para base de sistemas de localização.

A avaliação da PER em função da potência das microondas injectadas revela que os sistemas de localização conseguem operar face a uma enorme potência de ruído, mas também esclarece que a PER aumenta muito com a potência de ruído quando esta é superior à potência de operação do sistema, e com largura de banda igual ou superior à do canal *ZigBee*. O aumento da perda de pacotes (Fig. 5.3) tem como efeito directo a diminuição de dados usados pelo algoritmo de localização, que tem como função comparar o valor médio da força de sinal recebido com a *fingerprint* obtida na fase de treino da rede neuronal. A diminuição do número de dados faz aumentar a probabilidade de obter um maior erro no valor médio de RSSI, diminuindo assim a exactidão do sistema de localização. O atraso médio nas comunicações (Fig. 5.4) sofre um aumento significativo com o aumento da potência das microondas injectadas, acima da potência de operação do sistema. Este factor introduz maior latência em todo o processo de localização de pessoas e objectos.

Relativamente aos ensaios de orientação das antenas, a avaliação da PER, ilustrada na figura 5.3, não foi suficientemente esclarecedora. A distância usada nos ensaios pode ser um dos factores que está na origem da ausência de uma orientação preferencial para as comunicações. Com uma maior distância entre os módulos transmissor e receptor, as diferenças de desempenho com origem nas formas possíveis dos diagramas de radiação das antenas serão mais evidentes. O estudo dos diagramas de radiação das antenas poderá ajudar a obter uma orientação preferencial para as comunicações de um sistema IEEE 802.15.4 na presença de ruído. A avaliação do atraso médio nas comunicações, ilustrada na figura 5.4, revela uma clara diferença na influência da injeção de microondas em função da orientação em que este ruído é injectado. Também neste caso, o estudo do diagrama de radiação da antena injectora de microondas poderá ajudar a compreender este fenómeno.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi abordado o problema da coexistência de tecnologias de redes sem fios, focando a implementação de sistemas de localização em ambientes interiores. Foram avaliados vários sistemas de localização, identificando vantagens e desvantagens das tecnologias usadas e nas técnicas de localização aplicadas. Foi ainda realizado um estudo detalhado dos métodos de transmissão de dados afectos à tecnologia IEEE 802.15.4, nomeadamente sobre a modulação O-QPSK e a técnica de espalhamento DSSS. O desempenho de uma ligação *ZigBee* ponto-a-ponto foi avaliado nos parâmetros número de pacotes perdidos e atraso médio nas comunicações, em condições extremas de presença de ruído, e em função da orientação das várias antenas de todo o dispositivo experimental.

A análise da modulação O-QPSK e da técnica de espalhamento DSSS permitiu entender o processo de modulação e recuperação do sinal original, a introdução de redundância nos dados e a diversidade na transmissão dos mesmos, processo que permite ao sistema filtrar ruído existente na mesma banda, e com potência superior à do sinal a transmitir.

Os ensaios de potência revelaram que os sistemas de localização baseados na tecnologia IEEE 802.15.4 têm capacidade de operar na presença de ruído, quando este se apresenta na forma de pulsos estreitos, relativamente à largura de banda de um canal *ZigBee* (2 MHz). Em condições extremas de presença de ruído, os sistemas de localização continuam a conseguir funcionar, mas são afectados na sua exactidão e tempo de localização de uma pessoa ou objecto.

Os ensaios de orientação das antenas mostraram-se pouco esclarecedores. Ainda assim foi possível identificar o melhor desempenho do sistema com as antenas transmissora de dados e injectora de ruído na posição 45°.

Linhas orientadoras para trabalho futuro

Para trabalho futuro identifica-se a necessidade de efectuar ensaios de coexistência com o sistema de localização LOPES, verificando a influência do aumento da PER na variação de RSSI dos pacotes recebidos com sucesso. Deixa-se também uma nota para a pertinência do estudo dos diagramas de radiação das antenas, e para a necessidade de efectuar ensaios com maior distância, com o objectivo de conseguir determinar uma orientação preferencial para as comunicações de baixa potência, em coexistência com sistemas interferentes na banda ISM.

Este estudo deverá ser complementado com a avaliação do desempenho do sistema de localização na presença de outras comunicações na banda ISM 2,4 GHz, como o *Wi-Fi* ou o *Bluetooth*.

Referências

- [1] Oliveira, J.; Bartolomeu, P.; Fonseca, J.; Costa, L.; **Evaluating Severe Noise Interference in IEEE 802.15.4 based Location Systems**, (accepted on) *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'2008)*, 13th IEEE International Conference on, Hamburg, Germany, Sept. 2008.
- [2] Urruela, A.; Pags-Zamora, A. and Riba, J.; **Divide-and-Conquer based closed form Position Estimating for AOA and TDOA Measurements**, *ICASSP 2006, IEEE Proceedings on*; Volume IV, May 2006, pp.: 921-924.
- [3] Arndt, D.; Dickerson, E. and Ni, J.; **Ultra-Wideband Two-Cluster Angle-Of-Arrival Tracking System Design for Space Exploration**, *Y2006 ISSO Annual Report*, 2006, pp.: 11-16.
- [4] Steggles, P. and Gschwind, S.; **The Ubisense Smart Space Platform**, *A Ubisense White Paper*, May 2005.
- [5] Tadakamadla, S.; **Indoor Local Positioning System For ZigBee, Based On RSSI**, *M.Sc. Thesis report* within Electrical Engineering D, Electronics Design Programme, ITM Mid Sweden University; Oct. 2006.
- [6] Mukherjee, S.; Jones, K.; O'Shea, M. and Peng, X.-H.; **The Digital Patient Push - Using Location to Streamline the Surgical Journey**, *Advances in Medical, Signal and Information Processing, IET Proceedings of 3rd International Conference On (MEDSIP 2006)*; July 2006, pp.: 01-04.
- [7] Want, R.; Hopper, A.; Falcão, V. and Gibbons, J.; **The Active Badge Location System**, *Information Systems, ACM Transactions on*, Jan. 1992, pp.: 91-102.
- [8] Want, R. and Hopper, A.; **Active Badges and Personal Interactive Computing Objects**, *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 38, Nr. 1, Feb. 1992, pp.: 10-20.
- [9] Harter, A. and Hopper, A.; **A Distributed Location System for the Active Office**, *IEEE Network*, Jan./Feb. 1994, pp.: 62-70.
- [10] AT&T, Laboratories Cambridge, [Online], Available: <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/ab.html>.
- [11] Ward, A.; Jones, A. and Hopper, A.; **A new location technique for the active office**, *Personal Communications, IEEE*, Volume 4, Issue 5, Oct. 1997, pp.: 42-47.
- [12] AT&T, Laboratories Cambridge. [Online], Available: <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>.
- [13] Winkler, F.; Fischer, E.; Graß, E. and Fischer, G.; **A 60 GHz OFDM Indoor Localization System Based on DTDOA**, *14th IST Mobile & Wireless Communication Summit*, Dresden, Jun. 2005.
- [14] IEC The International Engineering Consortium, **OFDM for Mobile Data Communications**, *Web ProForum Tutorials*, 2004. [Online], Available: <http://www.iec.org>.
- [15] Fischer, G.; Dietrich, B.; Winkler, F.; **Bluetooth Indoor Localization System**, *1st Workshop on Positioning, Navigation and Communication, Proceedings of the (WPNC'04)*, pp.: 147-156.
- [16] The Parco Merged Media. [Online], Available: <http://www.parcomergedmedia.com/>.
- [17] Versus Technology Inc. [Online], Available: <http://www.versustech.com/>.
- [18] Time Domain Corporation. [Online], Available: <http://www.timedomain.com/>.
- [19] Ubisense. [Online], Available: www.ubisense.net.
- [20] PanGo Networks, Inc. [Online], Available: <http://www.pango.com>.
- [21] Cisco Systems, Inc., *Cisco® Wireless Location Appliance Data Sheet*, Setembro 2006.
- [22] Ekahau Inc. [Online], Available: <http://www.ekahau.com>.

- [23] Exavera Technologies, Inc. [Online], Available: <http://www.exavera.com>.
- [24] WiBorne, Inc. [Online], Available: <http://www.wiborne.com/>.
- [25] AeroScout, Inc. [Online], Available: <http://www.aeroscout.com/>.
- [26] Linnarsson, F.; Cheng, P. and Oelmann, B.; **SENTIO: A Hardware Platform for Rapid Prototyping of Wireless Sensor Networks**, *Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd IEEE Annual Conference on*, Nov. 2006, pp.: 3002-3006.
- [27] Chipcon Products from Texas Instruments, **CC2430DK Development Kit User Manual**, [Online], Available (June 2008): <http://focus.ti.com/lit/ug/swru133/swru133.pdf>.
- [28] A. Monteiro, **Projecto LOPES – Máquina de Localização**, *Relatório Final (IT-Aveiro)*, Março'08.
- [29] Fast Artificial Neural Network Library. [Online], Available: <http://leenissen.dk/fann/>.
- [30] ZigBee Alliance, **ZigBee Specification**, Document 053474r17, January 17, 2008.
- [31] ZigBee Alliance, (Jan. 2008), *Wireless control that simply works* [Online]. Available: <http://www.zigbee.org>.
- [32] “IEEE Std.802.15.4: IEEE standard for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LRWPANs)”, 2006.
- [33] Bartolomeu, P.; **Evaluating Bluetooth for the wireless transmission of MIDI**, *M.Sc. Dissertation* within Electronic and Telecommunications Engineering, University of Aveiro; Sept. 2005.
- [34] Koubaa, A.; Alves, M.; Nefzi, B. and Song Y. Q.; **Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks**, *Workshop on Real Time Networks (RTN'06), Proceedings of the 5th International Workshop on*, 4 July 2006, pp.: 35-40.
- [35] Maxim Integrated Products, **Application Note 1890**. [Online], Available: <http://www.maxim-ic.com/an1890>.
- [36] J. Zheng, M. L. Lee, **A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4**, *IEEE Press Book*, 2004.
- [37] S. Shin, H. Park, W. Kwon, **Mutual interference analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b**, *Computer Networks: Computer and Telecommunications Networking, The Int. Journal of*, Vol. 51, Issue 12, August 2007, pp.: 3338-3353.
- [38] “IEEE Std.802.11: IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification”, 1997.
- [39] A. Sikora, V. Groza; **Coexistence of IEEE 802.15.4 with other Systems in the 2.4 GHz-ISM-Band**, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. (IMTC 2005). Proceedings of the IEEE*, Vol. 3, May 2005, pp.: 1786-1791.
- [40] S. Shin, H. Park, S. Choi, W. Kwon, **Packet Error Rate Analysis of ZigBee Under WLAN and Bluetooth Interferences**, *Wireless Communications, IEEE Trans. on*, Vol. 6, Issue 8, Aug.2007, pp.: 2825-2830.
- [42] P. Bartolomeu, V. Silva, and J. Fonseca, **Delay measurement system for real-time serial data streams**, *Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on*, pp. 516–523, Sept. 2007.
- [43] MaxStream, Inc., XBee Series 1 OEM RF Module, Jan. 2007 [Online]. Available: <http://www.maxstream.net>.
- [44] Microchip, PIC18F2580, Oct. 2007 [Online]. Available: <http://www.microchip.com/>
- [] Digi, (January 2008), X-CTU, *software for configuring and testing MaxStream radio modems* [Online]. Available: <http://www.digi.com>.
- [46] Hewlett Packard, “HP 8753D Network Analyzer User's Guide”, Dec. 1997.
- [47] SMC Networks, EZ Connect™ SMCHMANT-4, 2.4 GHz Omni Directional Home Antenna Data Sheet, [Online]. Available: <http://www.smc.com>.

Anexo

Oliveira, J.; Bartolomeu, P.; Fonseca, J.; Costa, L.;
**Evaluating Severe Noise Interference in IEEE 802.15.4
based Location Systems,**
(accepted on) *Emerging Technologies and Factory Automation*
(ETFA'2008), 13th IEEE International Conference on,
Hamburg, Germany, September 2008.

Evaluating Severe Noise Interference in IEEE 802.15.4 based Location Systems

José Oliveira

DF - University of Aveiro / DI - Micro I/O
3810-193 Aveiro
jose.oliveira@ua.pt

José Fonseca

DETI – University of Aveiro
3810-193 Aveiro
jaf@ua.pt

Paulo Bartolomeu

DETI - University of Aveiro / DI - Micro I/O
3810-193 Aveiro
bartolomeu@microio.pt

Luís C. Costa

DF and I3N– University of Aveiro
3810-193 Aveiro
kady@ua.pt

Abstract

This paper studies the impact of severe ISM noise interference in IEEE 802.15.4 based location systems, in particular the LOPES project. The architecture and operation of the location system are presented as well as the underneath physical mechanisms supporting the IEEE 802.15.4 noise immunity. A test-bed is proposed and the assessment scenario is described by focusing on the trial parameters. Results show that this technology is able to operate in extreme harsh environments. However, this has a significant impact in the location system's performance.

1. Introduction

Asset and person location systems have had a huge development in the last years on a wide range of scenarios, specially in healthcare environments. Those systems are usually employed in research institutions and commercial environments to optimize logistics [1]. In healthcare centres, the so called real-time location systems (RTLS) are able to find and contact medical staff and patients [2, 3], to get the nearest free asset [4], or to trigger defined alarms. Many factories install these systems [2, 3, 5] to monitor manufacturing processes and track people. The main goals are improving the production performance and reduce costs.

LOPES¹ is a project aiming to develop a person location solution for indoor spaces with fine-grained resolution. A project prototype is to be installed in the Science Centre of Aveiro – FÁBRICA². This centre provides live contact with science and receives a large number of students every day. In a showroom named

“Mãos na Massa” (translation: “Hands on Science”) people can conduct basic science experiments. The location system will be installed in this showroom to monitor, in real-time, which exhibition items are being seen and played with. This allows a better management of the existing resources, e.g. items that usually do not have many visitors can be replaced. Other applications such as electronic guided tours or information delivery focused on personal preferences can be easily added to the system.

Because of its high availability, low cost, low power and adequacy we chose the ZigBee technology [6] to implement the LOPES location system. However, the target environment is open and, as such, is subject to interference from several sources operating in the same frequency range: Wi-Fi [7] hotspots, mobile phones with Bluetooth [8], WiMax devices [9], etc. This means that the location system may be compromised by interference, either by degrading its accuracy or blocking its operation. Therefore, an assessment of the ZigBee interference resilience must be conducted.

In this paper we discuss the ZigBee location system behaviour under severe electromagnetic interference. This work evaluates the impact of controlled microwave noise in a ZigBee point-to-point link. Our approach is focused on the packet error rate (PER) and in the communication average delay since these parameters have an high impact on the accuracy and responsiveness of the location system. Additionally, we discuss how the offset-quadrature phase shift keying (O-QPSK) modulation together with the Direct-sequence Spread Spectrum (DSSS) technique can improve the location system resilience to interference.

The paper is organized as follows: next section introduces the LOPES project and provides a brief explanation on its architecture and operation. In section 3 we discuss the interference on ZigBee links by presenting the related work and analysing the mechanisms employed in its mitigation. The following section presents our experimental setup, the trial

¹ Project 039/7.1/ADI/NOR – TELESAL – “Projecto LOPES” is a consortium integrated by the Universidade de Aveiro, Instituto de Telecomunicações, Micro I/O, Maisis and HFA, and it is supported by the Portuguese Innovation Agency (AdI).

² FÁBRICA is an initiative of the Universidade de Aveiro, integrated in Ciência Viva – Science Centers Network, supported by POCTI and FEDER. <http://www.ua.pt/fabrica/>

specifications as well as the experimental results and subsequent discussion. The last section concludes the paper and presents future work directions.

2. The LOPES project

As mentioned, the main ambition of the LOPES project is the development of a low cost indoor location system supporting fine-grained accuracy. To this purpose we have created a prototype based on the CC2431 radio transceiver from Texas Instruments. The architecture of the location system is presented in Figure 1. As it can be seen, the ZigBee network comprises three different types of nodes: ZigBee Coordinator (ZC), Reference Node (RN) and Blind Node (BN).

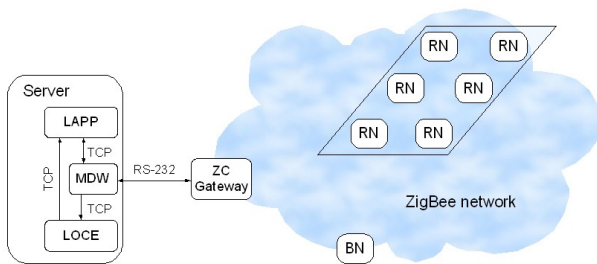


Figure 1. Location System Architecture

The ZigBee Coordinator handles the formation of the network and operates as a gateway between the wireless network and the server where the location application runs. Reference nodes are placed in pre-assigned locations in the room ceiling to create a grid of reference sensors. Blind Nodes are those carried by visitors.

The location application (LAPP) provides the middleware (MDW) with the list of Blind Nodes (BNs) to be discovered, which is also used to schedule localization requests. Each localization request is generated by the middleware and passed to the target Blind Node through the ZigBee Coordinator gateway in a transparent fashion. When a location request is received by a Blind Node, 10 ZigBee (network) broadcast messages with null payload (RSSI casts) are transmitted. Afterwards, a RSSI request is broadcasted to inform the Reference Nodes that the RSSI casts have been completed. These nodes store the received RSSI values as well as the Blind Node ID of the device that generate them.

The Receiver Signal Strength Indication (RSSI) is very sensible to environmental variations such as temperature or number of persons in the room. Therefore, to obtain a more representative value for comparison with the fingerprint database, 10 shots per trial are performed, i. e., 10 RSSI casts for each Blind Node.

Triggered by the RSSI request message, Reference Nodes build the Blind Node location frame containing the BN ID and the collected RSSI values. This frame is

then sent to the ZigBee Coordinator gateway using a unicast transmission, which forwards it through the RS-232 link to the middleware running in the server.

The LOPES server runs a Location Engine (LOCE) that outputs the (x,y) position of Blind Nodes when a RSSI signature is provided as input parameter. The Location Engine estimates the position of Blind Nodes using an Artificial Neural Network (ANN) that requires offline training.

The middleware operates as the glue keeping the location system together by handling requirements from the location application, sending requests to the ZigBee Network, managing responses and invoking the Location Engine to obtain the position of Blind Nodes.

3. Interference resilience

As it was explained, the LOPES project uses a localization technique based on RSSI fingerprints to determine the position of Blind Nodes. This technique is implemented using a wireless communication technology operating in the Industrial, Scientific and Medical (ISM) Band in an open environment. The fact that the ISM band is becoming crowded will have a significant impact on the performance of RSSI based location systems operating there.

The LOPES system uses both unicast and broadcast communications. Interference affecting broadcast packets (RSSI casts) results in their loss, thus reducing the number of RSSIs per Blind Node. The consequence is the decreased probability of getting an average RSSI value near the matching fingerprint, which degrades the accuracy of the position estimate. On the other hand, interference affecting unicast packets results in retransmissions, thus introducing latency and lowering the responsiveness of the location system.

3.1. Related Work

The performance of low-rate wireless personal area networks (LR-WPAN) based on the IEEE 802.15.4 standard [10] has been studied in terms of MAC properties and traffic load using simulation models in NS-2 [11] and OPNET [12]. The coexistence of IEEE 802.15.4 and Wireless Local Area Networks (WLANs) IEEE 802.11b [13] was simulated in [14] showing a LR-WPAN packet error rate (PER) of about 90% when operating within WLAN frequency domain. As expected, the higher transmission power and the robustness of the OFDM modulation do not allow ZigBee transmissions in the Wi-Fi band within the same range at the same time. These results were experimentally obtained in [15], where it was observed that the PER decreases (for LR-WPAN channels) as the IEEE 802.15.4 device moves away from the Wi-Fi one.

The coexistence of ZigBee networks facing microwave ovens or under the influence of Bluetooth communications was also studied in [16] and indicates

that a low interference occurs in these scenarios. In [17], the performance of a ZigBee point-to-point link was evaluated in coexistence with Bluetooth and Wi-Fi communications. A relation of the PER with the distance between the ZigBee link and each wireless network (Bluetooth and Wi-Fi) was achieved. The PER of ZigBee link can reach 16% when it is close to the piconet, decreasing below 1% for a distance of 2 m. Analyzing the coexistence with both noise sources, WLAN appears as the dominant interference.

None of these studies focus on the practical performance of IEEE 802.15.4 based communications in the presence of continuous high power noise. Although not common, it is a scenario worth of studying because it allows evaluating the behavior of IEEE 802.15.4 communications in extreme conditions. This evaluation will allow estimating the performance of the LOPES location system in severe interference conditions.

3.2. IEEE 802.15.4 physical layer

The IEEE 802.15.4 defines 27 channels where ZigBee is able to operate, one in 868 MHz with 20kbps (available in the European Union), 10 around 915MHz with 40kbps (for North America and Australia), and 16 in the 2,4 GHz free-license ISM band, operating at 250kbps maximum (for global use). To transmit data, IEEE 802.15.4 2,4 GHz PHY employs a 16-ary quasi-orthogonal modulation technique in which a data symbol is converted on one of 16 nearly orthogonal pseudo-random noise (PN) sequences. Each set of 4 bits – a data symbol – will be modulated in a set of 32 bits – one PN sequence. During the transmission process of the PN sequence, each bit will fill in a chip sequence to be sent using O-QPSK. This technique consists on splitting the chip values in even and odd ones, and then insert them one-by-one into two phase shifted sub-carriers, as it is shown in Figure 2.

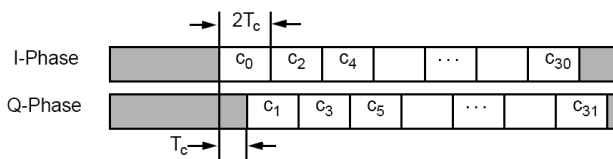


Figure 2. PN sequences processing into O-QPSK shifted sub-carriers (source [10]).

Considering the maximum bitrate of 250 kbps, the symbol rate is 62.5 ksymb/s. To cope with these rates, the standard defines a chip transmission rate of 2 Mchip/s, which means 0.5 μ s for the period of a chip value (T_c). Even and odd chip values will be sequentially inserted on the In-Phase and Quadrature-phase sub-carriers providing two $\pi/2$ shifted signals, as it is shown in Figure 3.

Transmitting the sub-carriers, shifted by an offset of T_c , is the base of Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). This method spreads data on a wider frequency

band distributing the initial carrier energy by all spreading sub-carriers. The ratio of spread bandwidth over unspread bandwidth is the same of chip rate over bit rate, and it is called processing gain (PG), usual presented in dB units, as:

$$PG = 10 \cdot \log \left(\frac{c_R}{b_R} \right) \quad (1)$$

Where:

c_R is the chip rate
 b_R is the bit rate.

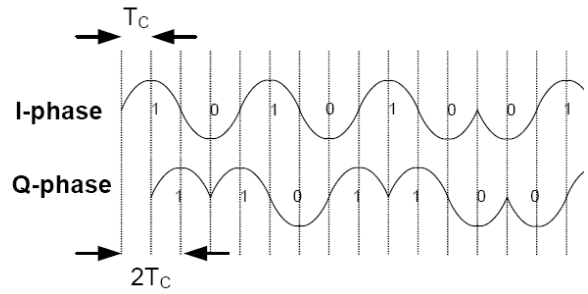


Figure 3. Half-sine pulses on O-QPSK shifted sub-carriers (source [10]).

The employed modulation technique introduces redundancy (each 4 data bits are represented by a 32 chip PN sequence) so that, even if some chip bits are affected by noise, the receiver is still able to obtain the correct symbol (4 data bits).

Spreading the carrier energy on a wider band is another step in increasing redundancy. If the received signal was encoded with a known “key” (PN sequence), the spread signal sub-carriers are joined into the initial carrier with a PG processing gain. Otherwise, the signal is spread with a PG ratio. This technique allows avoiding random noise and jamming.

In large ZigBee networks, such as the ones found in location systems, two PN sequences can be modulated in the same channel at the same time. To be allowed to decode the message, the receiver must know the spread spectrum code. Following, the receiver is able to decode the correct PN sequence while keeping the other one spread. This is the principle of code division multiple access (CDMA) modulation technique. DSSS also avoids multipath and fading effects rejecting incoming echoes with the previous decoded key.

4. Assessment

In this section we describe the test-bed used to assess the IEEE 802.15.4/ZigBee noise immunity. Results are presented and discussed with a focus on the Packet Error Rate and in the communication latency.

4.1. Test-Bed

The test-bed is composed of MioBee devices (data source and sink), a microwave generator, and a Delay Measurement System [18]. The source, microwave generator and sink are placed in a straight line, 1.5 m apart from each other. As shown in Figure 4, each MioBee device holds a Maxstream [19] ZigBee module and a PIC18F2580 microcontroller [20]. The MioBee source integrates a whip antenna while the MioBee sink uses a RPSMA antenna. A different antenna was chosen for the sink to improve the receiving sensitivity.



Figure 4. MioBee device without antenna.

Table 1 shows the settings used in the X-CTU software tool [21] to configure the MaxStream modules. This tool allows the definition of a large set of parameters including the operating channel, transmission power, etc. The selected channel (20) operates in the 2,449-2,451 GHz band. Both source and sink modules were configured to operate in the API mode with the firmware versions 8.117 – Coordinator and 8.317 – Router, respectively.

Table 1: Modules Configuration.

| | Data source | Data destination |
|-------------------|-------------|------------------|
| API function | Coordinator | Router |
| Operating Channel | 20 | 20 |
| Transmit Power | 0 dBm | - |

The radiation of microwaves (noise) was accomplished using an HP 8753D Network Analyzer [22], equipped with an onmi-directional antenna EZ Connect™ SMCHMANT-4 [23]. This equipment was configured to operate with a 2 MHz bandwidth, from 2,449 to 2,451 Ghz, thus overlapping the ZigBee operating band. The noise power settings for each trial are presented in Table 2.

The firmware running on the microcontroller generates ZigBee API formatted frames that are sent through the serial connection to the XBee module. These frames hold a one byte payload that is incremented in each transmission. The XBee module

Table 2: Trials Settings.

| | |
|---------------------------|------------------|
| # runs/test | 10 |
| # frames/run | 1000 |
| Frame rate | 5/s |
| Microwave radiation power | [-10, 0, 10] dBm |

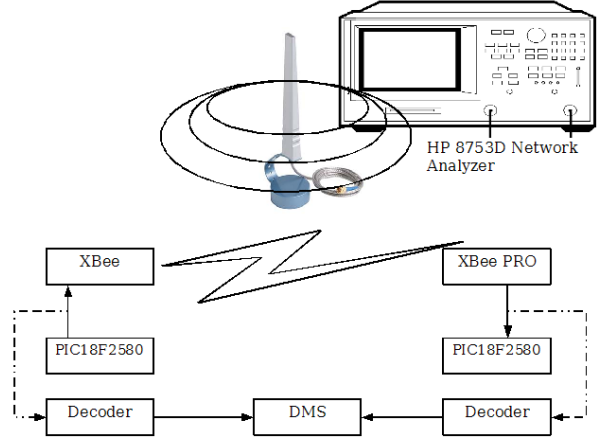


Figure 5. Test-bed setup.

receives the frame and proceeds with its transmission through the IEEE 802.15.4 radio modem, as documented in Figure 5. On the MioBee sink, for each received API frame (in the XBee module), an API frame is sent to the microcontroller. In order to evaluate the impact of interference on the ZigBee link, we used a Delay Measurement System (DMS) controlled by a dsPIC [24] microcontroller, which works with two sniffers, as shown in Figure 5. Each sniffer is connected to the serial line linking the microcontroller to the XBee module and listens for transmitted (source device) or received (sink device) API frames. When an API data frame is detected at either source or sink, its payload byte is transmitted to the DMS. By registering the instants where a byte is transmitted and received, the DMS can measure the communication delay. Besides measuring delays, the DMS is able to count lost frames, calculate minimum, maximum and average delays and provide the correspondent delay histogram.

4.2. Results

The experimental trials were conducted using the settings shown in Table 2.

Figure 6 shows the Packet Error Rate (PER) as function of noise power. As documented, the PER increases with noise power. For a noise of 10 dBm, the PER reaches the 97% threshold, which suggests that the bound of noise power, for ZigBee communications at 0 dBm, is 10 dBm.

The average delay plotting presented in Figure 7 exhibits a similar behavior when the noise power

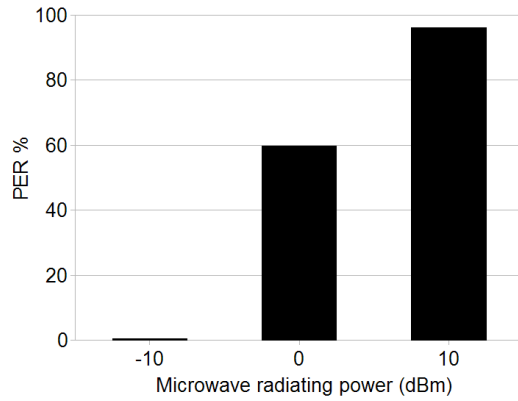


Figure 6. PER vs. noise power.

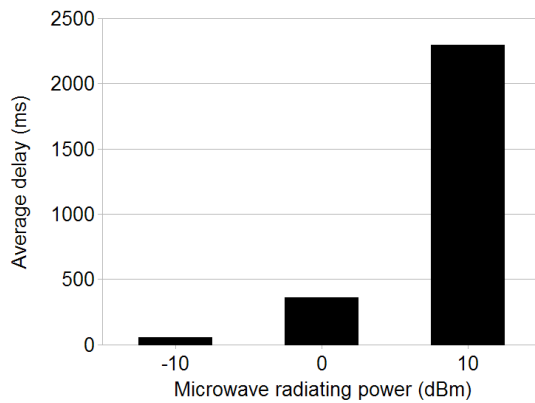


Figure 7. Average delay vs. noise power.

increases. The observed worst case delay sits at 2.3 s. Under these high power noise conditions, the location system would spend about 45 seconds to locate 1 person. This estimate was derived assuming a grid with 8 reference nodes where the Blind Node must successfully transmit 10 RSSI casts. It is also assumed that the RSSI casts stored in each Reference Node can be transmitted to the gateway in a single frame. Moreover, with such high PER, the number of available RSSIs (to obtain the fingerprint) should be smaller, affecting the location accuracy. Nevertheless, this is an extreme scenario in which the location system is still able to operate, even with degraded characteristics.

As mentioned, IEEE 802.15.4/ZigBee transmissions are performed at 0 dBm and are joined in the receiver (on a 250 kHz band) with a Processing Gain of 9 dB. If the microwave noise had a narrowband pulse shape, the DSSS decoding would spread it over a 2 MHz bandwidth. However, this is not the case since the noise was generated in all 2 MHz band, which results in a null processing gain in the unspreading process, as it is illustrated in Figure 8 (y axis not in scale). So, theoretically, we should not be able to have any successfully received packets in such high noise scenario. However, due to statistical deviations on radio-

frequency propagation and, eventually, power variations in the noise generator, we observe that communications can still occur, reinforcing the option for this technology in supporting indoor location systems.

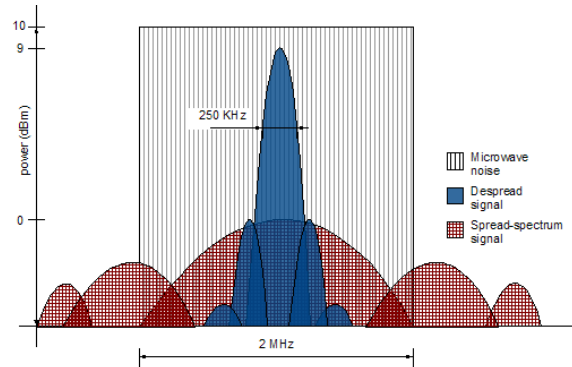


Figure 8. Despreading ZigBee data.

5. Conclusions

In this paper, we have presented an overview of LOPES, a IEEE 802.15.4/ZigBee based location system using RSSI fingerprinting. We have studied the behavior of a ZigBee link under severe interference to evaluate its impact on the performance of location systems. It has been shown that IEEE 802.15.4 based communications are highly reliable. In severe interference conditions, the localization is affected both in delay and accuracy. The analysis has highlighted that IEEE 802.15.4 based location systems are able to operate properly in coexistence with sharp narrowband interference, due to the employed modulation technique.

Future work includes a detailed analysis (quantification) of the noise impact in the accuracy and response time of the the LOPES location system.

Acknowledgment

This work has been supported by TELESAL - Rede de Competências em Telecomunicações e Tecnologias de Informação em Aveiro, funded by ADI (Agência de Inovação), under Projecto LOPES.

José Oliveira is supported by TELESAL under grant Ref. 039/7.1/ADI/NOR-TELESAL-“Projecto LOPES”.

Paulo Bartolomeu is supported by Fundação para a Ciencia e Tecnologia (FCT) under grant Ref. SFRH/BDE/15602/2006, POSI 2004 Medida 6.1 and by Micro I/O, Sistemas Electrónicos Lda.

This work was partially supported by NITEC/114/20/06 (71/00101), TIGELA - Tecnologias de Informação para Gestão de Locais de Acesso Público, Programa PRIME, funded by ADI (Agência de Inovação).

References

- [1] PanGo[®] – Location Management Platform, InnerWireless [Online]. Available: <http://www.innerwireless.com/>
- [2] Ekahau – Real-time asset and people tracking. [Online]. Available: <http://www.ekahau.com/>
- [3] AeroScout[®] – Real-time Visibility. [Online]. Available: <http://www.aeroscout.com/>
- [4] eShepherd[™] – Information-delivery solution, Exavera Technologies [Online]. Avail.: <http://www.exavera.com/>
- [5] Ubisense – Platform for Precise Real-time Location. [Online]. Available: <http://www.ubisense.net/>
- [6] ZigBee Alliance, (Jan. 2008), Wireless control that simply works [Online]. Available: <http://www.zigbee.org>
- [7] Wi-Fi Alliance, (January 2008), Wireless local networking based on IEEE 802.11 standards [Online]. Available: <http://www.wi-fi.org>
- [8] The Official Bluetooth[®] Technology Info Site <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/>
- [9] WiMax Forum, “the broadband wireless internet technology of choice anytime, anywhere”. [Online]. Available: <http://www.wimaxforum.org>
- [10] “IEEE Std.802.15.4: IEEE standard for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LRWPANs)”, 2006.
- [11] J. Zheng, M. L. Lee, “A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4”, IEEE Press Book, 2004.
- [12] A. Koubaa, M. Alves, B. Nefzi, and Y. Q. Song, “Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks”, *Workshop on Real Time Networks (RTN’06), Proc. 5th Int. Workshop on*, pp. 35-40, 4 Jul. 2006.
- [13] “IEEE Std.802.11: IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifiacaton”, 1997.
- [14] S. Shin, H. Park, W. Kwon, “Mutual interference analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b”, *Computer Networks: Computer and Telecommunications Networking, The Int. Journal of*, Vol. 51, Issue 12, pp. 3338-3353, August 2007.
- [15] B. Jung, *et al.*, “Ubiquitous Wearable Computer (UWC) – Aided Coexistence Algorithm in an Overlaid Network Environment of WLAN and ZigBee”, *Networks Wireless Pervasive Computing, 2007. (ISWPC ’07). 2nd Int. Symposium on*, pp. 212–217, 5-7 Feb. 2007.
- [16] A. Sikora, V. Groza; “Coexistence of IEEE 802.15.4 with other Systems in the 2.4 GHz–ISM– Band”, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. (IMTC 2005). Proceedings of the IEEE*, Vol. 3, pp. 1786–1791, May 2005.
- [17] S. Shin, H. Park, S. Choi, W. Kwon, “Packet Error Rate Analysis of ZigBee Under WLAN and Bluetooth Interferences”, *Wireless Communications, IEEE Trans. on*, Vol. 6, Issue 8, pp. 2825–2830, Aug.2007.
- [18] P. Bartolomeu, V. Silva, and J. Fonseca, “Delay measurement system for real-time serial data streams”, *Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on*, pp. 516–523, Sept. 2007.
- [19] MaxStream, Inc., XBee Series 1 OEM RF Module, Jan. 2007 [Online]. Available: <http://www.maxstream.net/>
- [20] Microchip, PIC18F2580, Oct. 2007 [Online]. Available: <http://www.microchip.com/>
- [21] Digi, (January 2008), X-CTU, software for configuring and testing MaxStream radio modems [Online]. Available: <http://www.digi.com>
- [22] Hewlett Packard, “HP 8753D Network Analyzer User's Guide”, Dec. 1997.
- [23] SMC Networks, EZ Connect[™] SMCHMANT-4, 2.4 GHz Omni Directional Home Antenna Data Sheet, [Online]. Available: <http://www.smc.com>
- [24] Microchip dsPIC30F6011, [Online]. Available (May 2007): <http://www.microchip.com>.